

3. И в а н о в - С м о л е н с к и й А. В. Электрические машины. — М.: Энергия, 1980. — 928 с.

4. К о в а ч К. П., Р а ц И. Переходные процессы в машинах переменного тока. — М.: Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 744 с.

Представлена кафедрой
специальных инженерных дисциплин

Поступила 28.12.1999

УДК 621.31.658

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Докт. экон. наук, проф. ПАДАЛКО Л. П., асп. ХАССАН ЕИД

Белорусская государственная политехническая академия

Одним из основных параметров электрических сетей является сечение проводов воздушных линий электропередачи. Как известно, для выбора сечений проводов разработаны экономические плотности тока, дифференцированные по материалу проводов (алюминий и медь), виду линий (воздушные или кабельные) и числу часов максимальных потерь энергии. Исходным для выбора оптимального сечения являлось условие минимума приведенных затрат в линию электропередачи [1, 2]. Разделив ток на оптимальное сечение, получаем его экономическую плотность

$$j_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{(E_{\text{н}} + P_{\text{ам}} + P_{\text{об}})b}{3\text{ртз}_{\text{э}}}} \quad (1)$$

Сечение, выбранное по экономической плотности тока, может не совпадать со стандартным. Поэтому оно округляется до ближайшего большего стандартного сечения, так как плотности тока были установлены на уровне предельно экономически допустимых.

В настоящее время значения параметров, входящих в формулу (1), существенно изменились [3]. Единогласного и утверждаемого сверху коэффициента $E_{\text{н}} = 0,12$ не существует. Вместо него появился банковский процент. Его значение, обусловленное спецификой страны, может быть больше или меньше $E_{\text{н}}$. Из нормы амортизации изъяты отчисления на капитальный ремонт, и поэтому значение коэффициента $P_{\text{ам}}$ примерно в два раза меньше. Существенное значение имеют стоимости 1 кВт · ч потерь энергии и материала проводов.

Выбор сечения проводов указанным выше способом исходит из статической постановки задачи. Она широко используется в проектной практике, когда, исходя из заданных характеристик электропотребления на некоторый перспективный период, определяются параметры электрической сети. Однако такая постановка задачи не соответствует реальному процессу развития сети, когда нагрузка на линии из года в год из-

меняется. Параллельно существующим линиям строятся новые, на перегруженных участках линий заменяются провода с меньшим сечением на провода с большим сечением и т. д. Выбор параметров, исходя из перспективных нагрузок, приводит к тому, что в течение ряда лет линии и трансформаторы работают со значительной недогрузкой.

Возможны различные варианты динамической постановки задачи.

В соответствии с требованием нового экономического критерия, каким является чистая дисконтированная стоимость, расчет должен вестись не для одного года, а для некоторого расчетного периода, равного сроку службы объекта. Это означает, что даже если передаваемая мощность неизменна по годам, то все равно за основу должен приниматься названный выше критерий. Все денежные поступления и затраты должны дисконтироваться.

Другой подход базируется не на однозначно заданных на конец расчетного периода исходных данных (цены, нагрузки), а на их динамике. При этом оптимизация осуществляется по названному выше экономическому критерию. В этом случае выбор сечения может осуществляться как однократно, так и в виде стратегии его замены на протяжении расчетного периода.

Для первого варианта динамической постановки критерий можно представить в виде

$$\max \sum_{t=1}^T (D_t - C_t)(1 + E)^{-t} - K_0 + K_n(1 + E)^{-T}, \quad (2)$$

где K_0 – инвестиции в линию электропередачи; C_t – эксплуатационные расходы (без учета амортизационных отчислений) в t -й год, включая стоимость потерь энергии; D_t – доход от продажи энергии; K_n – ликвидная стоимость линии по истечении ее срока службы; E – ставка банковского процента.

Задача заключается в выборе такого сечения провода, при котором данное выражение приобретает максимальное значение. Так как по всем сравниваемым вариантам величины D_t одинаковы, ее в выражении можно опустить. А если предполагать передаваемую мощность постоянной по годам, то $C_t = C$ можно вынести за знак Σ . Пренебрегая ликвидной стоимостью и учитывая справедливость соотношения $\max(-x) = \min x$, получаем критерий (2) в виде

$$\min \left(K_0 + C \sum_{t=1}^T (1 + E)^{-t} \right). \quad (3)$$

Определив сумму геометрической прогрессии под знаком Σ , получаем

$$\min \left(K_0 + C \frac{(1 + E)^T - 1}{(1 + E)^T E} \right). \quad (4)$$

Подставляя выражения для K_0 и C , беря производную по F и приравнявая ее к нулю, определим искомое сечение

$$F_{\text{opt}} = \frac{P}{u_{\text{н}} \cos \varphi} \sqrt{\frac{\rho \tau T_{\text{эз}} [(1 + E)^T - 1]}{\{(1 + E)^T E + P_{\text{об}} [(1 + E)^T - 1]\} b}} \quad (5)$$

Разделив ток на сечение, находим его экономическую плотность

$$j'_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{[(1 + E)^T E + P_{\text{об}} ((1 + E)^T - 1)] b \cdot 1000}{3 \rho \tau T_{\text{эз}} ((1 + E)^T - 1)}} \quad (6)$$

Рассчитаем значения экономических плотностей тока, принимая $T_{\text{эз}} = 4$ цент./кВт · ч, алюминиевый провод ($\rho = 32$ Ом·мм²/км), для различных значений τ : $E = 0,1$; $P_{\text{об}} = 0,03$; $b = 10$ долл./мм²·км; $T = 20$ лет. Величина b принята исходя из того, что цена 1 тонны алюминия равна 1200 у. е.

Результаты расчетов на базе этих исходных данных представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экономические плотности тока при $T_{\text{эз}} = 4$ цент./кВт · ч

τ , ч	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
$j_{\text{эк}}$, А/мм ²	0,62	0,44	0,36	0,98	0,31	0,25	0,24

Как видно, рассчитанные значения экономических плотностей тока оказались в 2–3 раза ниже их нормированных значений.

Рассчитаем значения экономической плотности тока при мировых ценах на электроэнергию, принимая $T_{\text{эз}} = 10$ цент./кВт·ч. Тогда получим их значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Экономические плотности тока при $T_{\text{эз}} = 10$ цент./кВт · ч

τ , ч	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
$j_{\text{эк}}$, А/мм ²	0,4	0,28	0,23	0,2	0,18	0,16	0,14

Отсюда видно, что экономические плотности тока понизились еще в большей мере (в 3–4 раза). Как показали расчеты, учет ликвидной стоимости проводов приводит к снижению значений экономической плотности тока только на 2–4 %, что находится в пределах погрешности исходных данных. Поэтому правильно, рассматривая длительный период (выше 10 лет), пренебречь ликвидной стоимостью.

Как отмечалось ранее, реальная нагрузка, для покрытия которой проектируется линия электропередачи, не является постоянной величиной. Как правило, она растет по мере увеличения мощности действующего потребителя или при присоединении к этой линии новых потребителей. В конечном итоге нагрузка либо стабилизируется при достижении потребителем проектной мощности, либо достигает такой величины, когда передача мощности становится недопустимой по техническим соображениям (нагрев проводов, потеря напряжения, статическая устой-

чивость). В этом случае возникает необходимость в реконструкции линии с целью повышения ее пропускной способности или строительстве дополнительной линии. Однако в обоих случаях требуется принятие компромиссного решения, так как при выборе большого сечения линия в первые годы будет недогружена, а при выборе малого сечения — перегружена в последующие годы. Величина оптимального сечения зависит от динамики электрической нагрузки, продолжительности расчетного периода и других факторов.

Принимая за основу динамический критерий (2), трансформируя его в затратный (3), принимая линейной зависимость стоимости линии электропередачи от сечения и предполагая, что инвестиции в ЛЭП вкладываются в год, предшествующий началу расчетного периода, получим

$$3 = (a + bF) + \sum_{t=1}^T \left(P_{об} (a + bF) + \frac{P_t^2 \rho \frac{l}{F} \tau T_{эз}}{u_H^2 \cos^2 \varphi} \right) (1 + E)^{-t}. \quad (7)$$

Преобразуя его, беря производную по сечению, приравнявая ее к нулю и решая относительно сечения, рассчитываем

$$F_{эк} = \frac{1}{u_H \cos \varphi} \sqrt{\frac{\rho \tau T_{эз} \sum_{t=1}^T P_t^2 (1 + E)^{-t}}{b \left(1 + \frac{P_{об} [(1 + E)^T - 1]}{(1 + E)^T E} \right)}}. \quad (8)$$

Величина экономической плотности будет зависеть от того, нагрузка какого года принимается за основу: если первого года, то получится минимальное значение $j_{эк}$; если же последнего года, то она составит максимальное значение $j_{эк}$. Можно сказать, что для постановки задачи с учетом динамики электрической нагрузки по годам понятие экономической плотности тока имеет условный характер и не отражает того реального экономического содержания, какое оно имеет для статической постановки. Выбор величины сечения проводов во многом зависит от характера динамики нагрузки. В этой связи возможны два варианта динамики.

В первом случае увеличение нагрузки характеризуется снижением темпа роста и стабилизацией ее значения по истечении некоторого расчетного периода (рис. 1).

Такая динамика характерна для вновь введенного потребителя, который постепенно, из года в год приближается к своей проектной мощности.

Величина искомого сечения будет зависеть от продолжительности периода роста нагрузки и принятого периода оптимизации. Если период возрастания нагрузки небольшой, а расчетный период значительный, то решающее влияние на выбор искомого решения окажет продолжительность расчетного периода оптимизации. Действительно, затраты этого периода будут превалировать в общих затратах, хотя по мере удаления

от начального момента отсчета их удельный вес в общей сумме будет снижаться из-за применения операции дисконтирования. При этом решающее влияние на выбор сечения окажет перспективная величина нагрузки.

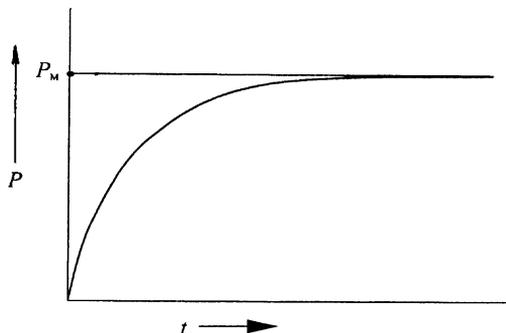


Рис. 1. Динамика электрической нагрузки

Если же период возрастания нагрузки составит значительный удельный вес в общем периоде оптимизации, то величина сечения будет определяться динамикой нагрузки и может оказаться ниже того значения экономического сечения, которое соответствует постоянной нагрузке.

Задачу выбора сечения для динамической постановки можно сформулировать иначе: исходя из заданной динамики электрической нагрузки требуется найти такую величину, выбор сечения на основе которой по экономической плотности тока будет соответствовать выбору сечения по формуле (8).

Обозначим искомую электрическую нагрузку через P . Тогда можно записать

$$j_{\text{эк}} = P \sqrt{\frac{b \left(1 + \frac{P_{\text{об}} \left[(1 + E)^T - 1 \right]}{(1 + E)^T E} \right)^{-T}}{3 \rho \tau T_{\text{эз}} \sum_{t=1}^T P_t^2 (1 + E)^{-t}}}. \quad (9)$$

Расчет величины $j_{\text{эк}}$ предполагает предварительное определение значения выражения, стоящего под знаком радикала, по данным о динамике электропотребления и при заданных значениях τ , $T_{\text{эз}}$ и b . Однако такой путь не является обязательным, так как можно воспользоваться для этого (8). Кстати, данное выражение можно конкретизировать еще в большей мере, если не ограничиваться расчетным периодом T , а принять его равным бесконечности. Это, естественно, не означает, что ЛЭП будет использоваться бесконечное время (срок службы ЛЭП может быть ограничен 30–40 годами), но это такой срок, при котором дисконтная сумма оказывается примерно равной величине, если T принять равным ∞ . Тогда (8) можно представить в виде

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{1}{u_{\text{H}} \cos \varphi} \sqrt{\frac{\rho \tau T_{\text{ЭЭ}} \sum_{t=1}^{\infty} P_t (1+E)^{-t}}{b \left[1 + (P_{\text{ам}} + P_{\text{об}}) \frac{1}{E} \right]}}. \quad (10)$$

Отличие данного выражения от (8) состоит в том, что здесь учитываются амортизационные отчисления, которыми мы пренебрегли вполне обоснованно в (8).

Учитывая принятый характер динамики электропотребления, преобразуем это выражение дальше, разбивая весь период на два временных отрезка: от начала отсчета до момента стабилизации нагрузки и от момента стабилизации нагрузки до бесконечности. Тогда выражение под знаком суммы запишется

$$\sum_{t=1}^{\infty} P_t (1+E)^{-t} = \sum_{t=1}^l P_t (1+E)^{-t} + P \sum_{t=l+1}^{\infty} (1+E)^{-t}.$$

Преобразуя его, получим

$$\sum_{t=1}^{\infty} P_t (1+E)^{-t} = \sum_{t=1}^l P_t (1+E)^{-t} + \frac{P}{E}.$$

Выражение (9) представим в виде

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{1}{u_{\text{H}} \cos \varphi} \sqrt{\frac{\rho \tau T_{\text{ЭЭ}} \left(\sum_{t=1}^l P_t (1+E)^{-t} + \frac{P}{E} \right)}{b \left[1 + (P_{\text{ам}} + P_{\text{об}}) \frac{1}{E} \right]}}. \quad (11)$$

Выбранное по данной формуле сечение справедливо для заданного соотношения цен на электроэнергию и материал проводов ($T_{\text{ЭЭ}}/b$), данного τ , данной динамики нагрузки $P(t)$ и ее постоянной величины P .

Рассмотрим теперь случай выбора сечения для непрерывно растущей динамики электрической нагрузки, представленной на рис. 2.

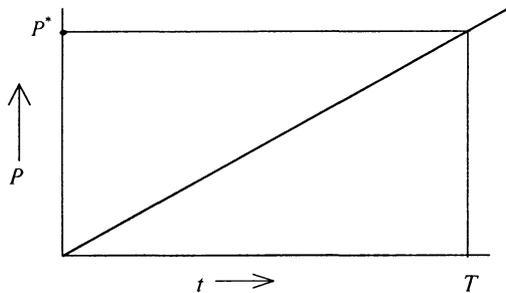


Рис. 2

Если срок службы линии ограничен периодом T , то постановка задачи адекватна использованию критериев (3) или (7). При выборе сечения по экономическому критерию важен контроль соблюдения технических

ограничений, особенно на нагрузки конца расчетного периода. Однако можно предполагать, что в условиях нового соотношения цен на электроэнергию и металл ($T_{эз}/b$) экономическое сечение будет иметь повышенную величину по сравнению с прежними нормированными значениями плотности тока. А это будет благоприятствовать соблюдению технических ограничений (по нагреву, потерям напряжения).

По истечении расчетного периода возможны несколько вариантов обеспечения электроснабжения потребителей. Первый – это замена сечения на большее. При этом величина нового сечения и срок замены определяются на основе специальных технико-экономических расчетов. Такое реконструктивное решение применяют в первую очередь для линий 10 кВ.

Другой вариант решения – это строительство дополнительной линии, которая берет на себя часть нагрузки первой линии, тем самым разгружая ее и обеспечивая снижение потерь энергии. Так как дополнительная линия обеспечивает получение экономического эффекта от снижения потерь энергии, должна быть изучена экономическая целесообразность сооружения ее раньше, чем первая линия достигнет предела своей пропускной способности. Следует учитывать следующее обстоятельство: так как отдельная линия является элементом всей системы энергоснабжения, строительство дополнительной линии обязательно должно осуществляться рядом, как бы в виде второй цепи к действующей. Эта линия может быть проложена по другой трассе и от другого источника.

Третий вариант решения – это строительство линии более высокого номинального напряжения взамен существующей или дополнительно к ней. Это может быть переход от 10 к 35, от 35 к 110 и от 110 к 220 кВ. Переход на более высокую ступень номинального напряжения в несколько раз повышает пропускную способность сети и целесообразен поэтому тогда, когда отмечается значительное возрастание нагрузки.

Таким образом, рассматривая задачу электроснабжения узла в динамической постановке, следует вопросы выбора сечения проводов увязывать с другими мероприятиями по повышению пропускной способности, а именно с заменой сечения и сооружением дополнительных линий прежнего и более высокого номинального напряжения.

ВЫВОД

В условиях новых соотношений между ценами на электроэнергию и металл проводов и экономического критерия чистой дисконтированной стоимости существенно снижаются значения экономической плотности тока, что расширяет сферу их применения в электрических сетях, включая сети напряжением 6–35 кВ. Более низкие значения экономической плотности тока должны привести к изменению шкалы стандартных сечений проводов в сторону их повышения. Выбор сечения проводов для динамической нагрузки должен производиться на базе технико-экономических оптимизационных расчетов, а не на основе экономической плотности тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Энергетические системы. – Мн.: Выш. шк., 1974.
2. Падалко Л. П., Пекелис Г. Б. Экономика электроэнергетических систем. – Мн.: Выш. шк., 1985.
3. Ковалев И. Н., Осипов М. А. Об экономически целесообразных плотностях тока в линиях электропередачи // Электричество. – 1999. – № 9.

Представлена кафедрой экономики
и организации энергетики

Поступила 27.07.2000