

ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Технические потери электроэнергии ΔW в распределительных электрических сетях 0,38–6–10 кВ обусловлены физическими процессами в проводниках и оборудовании и зависят от пропускаемой по сети электроэнергии W , как прогнозируемой, так и фактической [1]. В статье выполнены анализ и оценка экономического минимума потерь на примере обобщенной схемы сети.



М.И. ФУРСАНОВ,
Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических систем БНТУ

Annotation

Technical losses of electric power ΔW in power distribution networks 0.38–6–10 kV are caused by physical processes in conductors and equipment, and they depend on electric power W in circuits as both projected and actual power [1]. Economical minimum losses are analyzed and evaluated in the article as illustrated by the generalized chart of the network.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2016 года

Анализ аналитических зависимостей потерь в относительных (ΔW , %) и абсолютных (ΔW , тыс. кВт·ч) единицах от величины W проведен автором в [2, 3]. Он позволяет определить технический оптимум (минимум) относительных потерь электроэнергии, соответствующий равенству условно-постоянных потерь в силовых трансформаторах 6(10)/0,4 кВ и нагрузочных потерь электроэнергии в линиях 0,38–6–10 кВ и трансформаторах. Исследование показало, что, к сожалению, минимальные технические потери чаще всего обеспечиваются в условиях очень незначительной загрузки линий и трансформаторов, поэтому в качестве критерия оптимального состояния сети следует принимать не минимум технических потерь, а их экономически обоснованные значения, полученные при минимальной стоимости передачи электрической энергии C_n , руб./кВт·ч [4, 5].

Аналитические зависимости стоимости C_n и затрат на передачу электрической энергии Z_n от отпуска электроэнергии W имеют вид, похожий на кривые $\Delta W\% = f(W)$ и $\Delta W = f(W)$ (рис. 1).

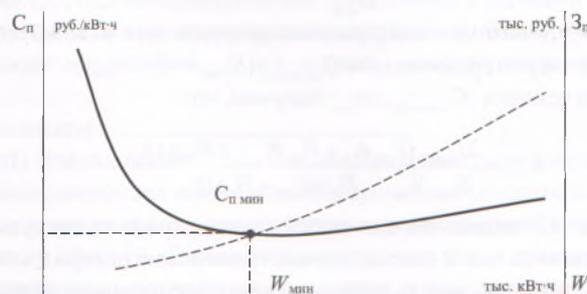


Рис. 1. Динамика показателей C_n и Z_n (пунктирная линия) в функции W

Из рисунка видно, что зависимость $C_n = f(W)$ имеет минимум $C_{n\text{мин}}$ (отмечен точкой на сплошной линии), соответствующий равенству условно-постоянной и переменной составляющих стоимости передачи электрической энергии C_n [4, 5].

Определим состояние распределительной сети 0,38–6–10 кВ, соответствующее экономическому оптимуму (минимуму) относительных потерь электрической энергии.

Анализ и оценку экономического минимума потерь выполним на примере обобщенной схемы сети, рассмотренной в [2, 3]: к одиночной линии 10 кВ ($F = 50 \text{ мм}^2$, $l = 1 \text{ км}$, $R_0 = 0,60 \text{ Ом/км}$, $K_{050} = 4\,800\,000 \text{ руб./км}$) подключен трансформатор 6(10)/0,4 кВ ($S_{ном} = 100 \text{ кВА}$, $\Delta P_x = 0,27 \text{ кВт}$, $\Delta P_k = 1,97 \text{ кВт}$, $K_f = 16\,550\,000 \text{ руб.}$), от которого отходит одиночная линия 0,38 кВ ($F = 35 \text{ мм}^2$, $l = 1 \text{ км}$, $R_0 = 0,79 \text{ Ом/км}$, $K_{035} = 3\,300\,000 \text{ руб./км}$).

Для исследуемой схемы стоимость передачи электрической энергии C_n состоит из трех основных составляющих – $C_{n\text{пл } 6-10}$, C_T и $C_{n\text{пл } 0,38}$:

$$C_n = C_{n\text{пл } 6-10} + C_T + C_{n\text{пл } 0,38} \quad (1)$$

где $C_{n\text{пл } 6-10}$ – стоимость передачи электроэнергии по сети 6–10 кВ; C_T – стоимость трансформации энергии; $C_{n\text{пл } 0,38}$ – стоимость передачи электроэнергии по сети 0,38 кВ.

Оценку и анализ загрузки и уровней относительных экономически обоснованных технических потерь электроэнергии также выполним поочередно – сначала для трансформатора 6(10)/0,4 кВ, затем для сетей 6(10) и 0,38 кВ отдельно и при их совместной работе.

Понижающие потребительские трансформаторы 6(10)/0,4 кВ

Стоимость трансформации электрической энергии C_T является основной технико-экономической характеристикой трансформатора и определяется по формуле [5]

$$C_T = (P_T K_T + \Delta W_{XT} \beta_{XT} + \Delta W_{HT} \beta_{HT}) / W_t, \quad (2)$$

где P_T – суммарный коэффициент отчислений от стоимости трансформатора ($P_T = E_n + P_{ат} + P_{трот}$, где E_n – норма дисконта, $P_{ат}$ – коэффициент амортизационных отчислений, $P_{трот}$ – отчисления на текущий ремонт и обслуживание трансформатора); β_{XT} – стоимость 1 кВт·ч потерь холостого хода ΔW_{XT} ; β_{HT} – стоимость 1 кВт·ч нагрузочных потерь ΔW_{HT} ; W_t – пропуск электроэнергии за расчетный период t :

$$W_t = \sum_1^p P_{\Delta t} \Delta t, \quad (3)$$

где $P_{\Delta t}$ и Δt – постоянные составляющие графика нагрузки трансформатора, имеющие p – одинаковые временные интервалы Δt и значения $P_{\Delta t}$.

Для любого интервала Δt формулу (2) можно записать в виде

$$C_{T\Delta t} = (P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT} + \frac{S_{\Delta t}^2}{U_{НОМ}^2} R_T \Delta t \beta_{HT}) / W_{\Delta t}. \quad (4)$$

Представим (4) в виде

$$\begin{aligned} C_{T\Delta t} &= \frac{(P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT} + \frac{S_{\Delta t}^2}{U_{НОМ}^2} R_T \Delta t \beta_{HT})}{W_{\Delta t}} = \\ &= \frac{(P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT} + k_{CT\Delta t}^2 \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} R_T \Delta t \beta_{HT})}{W_{\Delta t}} = \\ &= \frac{(P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT})}{W_{\Delta t}} + \frac{k_{CT\Delta t}^2 S_{НОМ}^2 R_T \Delta t \beta_{HT}}{W_{\Delta t} U_{НОМ}^2} = \\ &= \frac{P_{T\Delta t} K_T / \Delta t + \Delta P_{XT} \beta_{XT}}{k_{CT\Delta t} S_{НОМ} \cos \varphi \Delta t} + \frac{k_{CT\Delta t}^2 S_{НОМ}^2 R_T \Delta t \beta_{HT}}{k_{CT\Delta t} S_{НОМ} \cos \varphi \Delta t U_{НОМ}^2} = \\ &= \frac{P_{T\Delta t} K_T / \Delta t + \Delta P_{XT} \beta_{XT}}{k_{CT\Delta t} S_{НОМ} \cos \varphi} + \frac{k_{CT\Delta t} S_{НОМ} R_T \beta_{HT}}{\cos \varphi U_{НОМ}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $P_{T\Delta t}$ – суммарный коэффициент отчислений за время Δt , а $W_{\Delta t} = P_{T\Delta t} \Delta t = S_{НОМ} \cos \varphi \cdot \Delta t$.

Определим коэффициент загрузки трансформатора $k_{CT\Delta t}$, соответствующий минимуму $C_{T\Delta t}$, по которому находится экономически обоснованное значение относительных потерь в трансформаторе.

Из условия

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{T\Delta t}}{\partial k_{CT\Delta t}} &= \frac{-S_{НОМ} \cos \varphi (P_{T\Delta t} K_T / \Delta t + \Delta P_{XT} \beta_{XT})}{k_{CT\Delta t}^2 S_{НОМ}^2 \cos^2 \varphi} + \frac{S_{НОМ} R_T \beta_{HT}}{\cos \varphi U_{НОМ}^2} = \\ &= -\frac{P_{T\Delta t} K_T / \Delta t + \Delta P_{XT} \beta_{XT}}{k_{CT\Delta t}^2 S_{НОМ}^2 \cos^2 \varphi} + \frac{R_T \beta_{HT}}{U_{НОМ}^2} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

получим, что

$$k_{CT\Delta t} = \frac{U_{НОМ}}{S_{НОМ}} \sqrt{\frac{P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT}}{R_T \Delta t \beta_{HT}}}. \quad (7)$$

Из (6), (7) видно, что для любой ступени графика нагрузки трансформатора длительностью Δt экономически обоснованное (минимальное) значение относительных технических потерь электроэнергии в трансформаторе распределительной

сети будет в том случае, когда стоимость нагрузочных потерь электроэнергии в обмотках трансформатора равна условно-постоянной составляющей стоимости C_T (сумме отчислений от K_T и стоимости потерь холостого хода).

Представим формулу определения $k_{CT\Delta t}$ (далее k_{CT}) в виде

$$k_{CT} = \sqrt{\frac{P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT}}{\Delta P_{XT} \Delta t \beta_{HT}}} \quad (8)$$

и сравним ее с формулой оценки величины $k_{\Delta W}$, соответствующего техническому оптимуму (минимуму) потерь в трансформаторе

$$k_{\Delta W} = \sqrt{\frac{\Delta P_{XT}}{\Delta P_{XT}}}. \quad (9)$$

Видно, что при $\beta_{XT} = \beta_{HT}$ значение k_{CT} всегда будет больше $k_{\Delta W}$ из-за наличия в числителе формулы (8) составляющей $P_{T\Delta t} K_T$. Это означает, что величина экономического оптимума (минимума) потерь всегда будет больше технически обоснованного значения потерь электроэнергии в трансформаторе.

Исходные данные и результаты расчеты оптимальных (минимальных) коэффициентов загрузки $k_{\Delta W}$ и k_{CT} суммарных экономически (ΔW_{CT}) и технически (ΔW_T) обоснованных значений потерь электроэнергии в двухобмоточных трансформаторах распределительных сетей приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что экономически обоснованная величина (минимум) относительных технических потерь электроэнергии в двухобмоточных трансформаторах 6(10)/0,4 кВ также достаточно невелика – 1,3...3,6 %, однако загрузка трансформаторов при этом значительно выше – от 60 до 93 %. Наиболее предпочтительным с точки зрения экономического минимума относительных потерь является режим работы трансформаторов с равномерным графиком нагрузки.

Электрическая сеть 6–10 кВ

В распределительной сети 6–10 кВ стоимость передачи электрической энергии $C_{пл 6-10}$ определяется по формуле

$$C_{пл 6-10} = P_{л} K_{л} + \Delta W_{нл} \beta_{нл} + P_T K_T + \Delta W_{XT} \beta_{XT} + \Delta W_{HT} \beta_{HT}, \quad (10)$$

где $P_{л} = E_n + P_{ал} + P_{тротл}$ – суммарный коэффициент отчислений от стоимости $K_{л}$ линии 6–10 кВ. По аналогии с трансформаторами формула для определения $C_{пл 6-10}$ для произвольного Δt выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{пл 6-10} &= P_{л\Delta t} K_{л} + \frac{S_{\Delta t}^2}{U_{НОМ}^2} R_{л\Delta t} \Delta t \beta_{нл} + P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT} + \\ &+ \frac{S_{\Delta t}^2}{U_{НОМ}^2} R_T \Delta t \beta_{HT} = P_{л\Delta t} K_{л} + P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT} + \\ &+ k_{CT\Delta t}^2 \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} (R_{л} + R_T) \Delta t, \end{aligned} \quad (11)$$

где $k_{CT\Delta t}$ – искомый коэффициент загрузки сети 6–10 кВ, соответствующий минимуму $C_{пл 6-10\Delta t}$ ($k_{CT\Delta t} = S_{\Delta t}^2 / S_{НОМ}^2$).

Из условия $\partial C_{пл 6-10\Delta t} / \partial k_{CT\Delta t} = 0$ получим, что

$$k_{CT\Delta t} = \frac{U_{НОМ}}{S_{НОМ}} \sqrt{\frac{P_{л\Delta t} K_{л} + P_{T\Delta t} K_T + \Delta P_{XT} \Delta t \beta_{XT}}{R_{л\Delta t} \Delta t \beta_{нл} + R_T \Delta t \beta_{HT}}}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что для любой ступени графика нагрузки длительностью Δt относительные технические потери в сети 6–10 кВ будут иметь экономически обоснованное (минимальное) значение в том случае, когда стоимость нагрузочных потерь электроэнергии (знаменатель формулы (12))

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчета потерь в трансформаторах распределительных электрических сетей

$S_{ном}$, кВА	$\Delta P_{\text{л}}$, кВт	$\Delta P_{\text{т}}$, кВт	$k\Delta W$, о.е.	$P_{2\text{т}}$, кВт	$\Delta W_{\text{т}}$, %	$K_{\text{т}}$, млн руб	$k_{\text{ст}}$	$P_{2\text{ст}}$, кВт	$\Delta W_{\text{ст}}$, %
16	0,085	0,440	0,43	5,50	3,00	10,129	0,93	11,9	3,6
25	0,115	0,600	0,44	8,80	2,55	11,306	0,86	17,2	3,1
40	0,155	0,880	0,42	13,44	2,25	12,78	0,78	25,0	2,7
63	0,220	1,280	0,41	20,66	2,09	15,039	0,71	35,8	2,4
100	0,270	1,970	0,37	29,66	1,80	16,55	0,61	48,8	2,0
160	0,410	2,600	0,40	51,20	1,58	21,557	0,63	80,6	1,75
250	0,580	3,700	0,40	80,00	1,43	28,995	0,62	124,0	1,56
400	0,830	5,400	0,39	124,80	1,31	37,840	0,6	192,0	1,42
630	1,240	7,400	0,41	206,64	1,19	57,113	0,63	317,5	1,30
Среднее значение	0,43	2,7	0,40	60,07					

Примечания:

$$P_{2\text{ст}} = k_{\text{ст}} S_{\text{ном}} \cos\varphi^2; W_{2\text{т}} = P_{2\text{т}} \Delta t; \Delta W_{\text{ст}} \% = \frac{(\Delta W_{\text{хт}} + \Delta W_{\text{нт}}) \cdot 10^2}{W_{\text{г}}}; \Delta W_{\text{хт}} = \Delta P_{\text{хт}} \Delta t; \Delta W_{\text{нт}} = \Delta P_{\text{кт}} k_{\text{ст}}^2 \Delta t; W_{\text{гв}} = W_{2\text{т}} + \Delta W_{\text{хт}} + \Delta W_{\text{нт}}$$

равна условно-постоянной составляющей $C_{\text{пл}6-10}$ (числитель формулы (12)). При этом значение $k_{\text{сп}\Delta t}$ в (12) всегда будет несколько больше $k_{\text{ст}}$ в (8) из-за появления в числителе (12) дополнительной составляющей стоимости линии 6–10 кВ.

Для исследуемой схемы при принятых стоимостных данных $k_{\text{ст}} = 0,61$, а $k_{\text{сп}} = 0,65$. Процент технических потерь электроэнергии в сети 6–10 кВ (2,1%) при этом больше $\Delta W_{\text{ст}} = 2\%$, то есть увеличился. На практике величина $k_{\text{сп}}$ будет зависеть от соотношения активных эквивалентных сопротивлений линий 6–10 кВ $R_{\text{л}}$ и трансформаторов $R_{\text{т}}$, которые характеризуют структуру (разветвленность и протяженность) исследуемой сети. В примере $R_{\text{л}} = 0,6$, а $R_{\text{т}} = 19,7$ Ом. В реальных условиях эксплуатации эквивалентные сопротивления линий 6–10 кВ могут быть больше $R_{\text{т}}$.

Электрическая сеть 0,38–10 кВ

Для распределительной электрической сети 0,38–10 кВ в целом величина $C_{\text{п}}$ за время Δt определяется по формуле

$$C_{\text{пл}\Delta t} = C_{\text{пл}6-10\Delta t} + P_{\text{л}0,38\Delta t} K_{\text{л}0,38} + \frac{S_{\Delta t}^2}{U_{\text{ном}0,38}^2} R_{0,38} \Delta t \beta_{\text{нл}0,38}, \quad (13)$$

а экономически обоснованный коэффициент загрузки сети 0,38–10 кВ $k_{\text{сп}}$ будет равен

$$k_{\text{сп}} = \frac{U_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}} \sqrt{\frac{P_{\text{л}\Delta t} K_{\text{л}} + P_{\text{л}0,38\Delta t} K_{\text{л}0,38} + P_{\text{т}\Delta t} K_{\text{т}} + \Delta P_{\text{хт}} \Delta t \beta_{\text{хт}}}{R_{\text{л}} \Delta t \beta_{\text{нл}} + R_{\text{л}0,38} \left(\frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}0,38}}\right)^2 \Delta t \beta_{\text{нл}0,38} + R_{\text{т}} \Delta t \beta_{\text{нт}}}}. \quad (14)$$

Из анализа формул (8), (12) и (14) видно, что $k_{\text{сп}} > k_{\text{ст}}$, но $< k_{\text{сп}}$. В примере $k_{\text{сп}} = 0,65$, $k_{\text{ст}} = 0,61$, $k_{\text{сп}} = 0,13$ преобладающее влияние на сильное снижение величины $k_{\text{сп}}$ оказывают потери электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ. В условиях эксплуатации распределительных сетей 0,38–10 кВ полученные между параметрами $k_{\text{сп}}$, $k_{\text{ст}}$ и $k_{\text{сп}}$ соотношения будут сохраняться.

Выводы

1. При постоянном составе оборудования экономически обоснованное значение (минимум) суммарных относительных технических потерь электроэнергии в распределительной сети 0,38–10 кВ достигается в случае, когда стоимость нагрузочных потерь электроэнергии в трансформаторах 6(10)/0,4 кВ равна условно-постоянной составляющей стоимости передачи электрической энергии в сети (сумме от-

числений от капитальных вложений в линии и трансформаторы и стоимости потерь холостого хода).

2. Наивыгоднейшая экономическая загрузка трансформаторов 6(10)/0,4 кВ (в примере 0,6...0,93) значительно выше загрузки трансформаторов (0,37...0,44), соответствующей техническому минимуму потерь.

3. В распределительной сети в целом оптимальный коэффициент загрузки $k_{\text{сп}}$ в значительной мере зависит от ее конфигурации и конструктивного исполнения, при этом чем больше разветвленность сети, тем больше величина $k_{\text{сп}}$ по сравнению с $k_{\text{ст}}$.

4. Основное влияние на формирование и величину стоимости нагрузочных потерь электроэнергии в сети 0,38–10 кВ оказывают сети 0,38 кВ – потери в них больше потерь в сетях 6–10 кВ в несколько раз. Кроме того, потери в сети 0,38 кВ значительно снижают величину обобщенного коэффициента $k_{\text{сп}}$ (в примере в 0,65/0,13 = 5 раз) и увеличивают экономическое значение потерь в сети 0,38–10 кВ (в примере – до 10,5%).

5. Приведенные в статье аналитические соотношения позволяют оценить фактическую и экономически обоснованную загрузку распределительной сети, определить экономический минимум потерь электроэнергии, резервы и стратегию по их снижению.

6. Идеальным и в условиях Smart Grid достижимым с точки зрения минимума стоимости передачи электрической энергии в распределительной сети 0,38–10 кВ является режим работы сети с равномерным графиком нагрузки.

Список литературы

1. Методика расчета и обоснования нормативов расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям: СТП 09110.09.455-11. – Введ. 01.01.2012. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2011. – 51 с.
2. Фурсанов, М.И. Оптимальные технические потери электроэнергии в силовых трансформаторах распределительных электрических сетей. / М.И. Фурсанов // Энергетическая стратегия. – 2016. – № 2(50). – С. 42–45.
3. Фурсанов, М.И. Оптимальные технические потери электроэнергии в в распределительных электрических сетях / М.И. Фурсанов // Энергетическая стратегия. – 2016. – № 3(51). – С. 25–28.
4. Фурсанов, М.И. Основы проектирования энергосистем: учеб. пособие для студентов энергетических специальностей в 2 ч. / М.И. Фурсанов, В.Т. Федин. – Минск: БНТУ, 2010. – Ч. 2. – 203 с.
5. Фурсанов, М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М.И. Фурсанов. – Минск: Белэнергосбережение, 2005. – 207 с.