

# ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Под оптимальными техническими потерями в распределительных электрических сетях понимают минимум суммарных относительных потерь электроэнергии, соответствующий равенству условно-постоянных и переменных потерь в сети [1].

В прошлом номере журнала был опубликован материал, посвященный исследованию оптимальных технических потерь в силовых трансформаторах. В настоящей статье оценены и проанализированы загрузка и оптимальные уровни относительных технических потерь электроэнергии в основных структурных составляющих распределительных сетей – в сетях 6–10 кВ и в условиях принятого в Республике Беларусь совместного расчета электрических сетей 0,38 и 6–10 кВ [2].



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

## Расчет технических потерь электроэнергии в электрических сетях 6–10 кВ

В распределительной электрической сети 6–10 кВ технические потери электроэнергии  $\Delta W_{6-10}$  состоят из трех компонентов:

$$\Delta W_{6-10} = \Delta W_{Л6-10} + \Delta W_{НТ} + \Delta W_{Х}, \quad (1)$$

где  $\Delta W_{Л6-10}$  – нагрузочные потери электроэнергии в линиях 6–10 кВ;  $\Delta W_{НТ}$  – нагрузочные потери электроэнергии в трансформаторах;  $\Delta W_{Х}$  – потери электроэнергии холостого хода.

Принимая во внимание, что реальный график нагрузки потребителей за период  $T$  может быть представлен состоящим из  $n$  одинаковых элементарных отрезков длительностью  $\Delta t$ , формулу для определения технических потерь электроэнергии в сети 6–10 кВ для произвольного  $\Delta t$  можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta W_{6-10} &= \frac{P_{\Delta t}^2 + Q_{\Delta t}^2}{U_{НОМ}^2} R_{Л6-10} \Delta t + \frac{P_{\Delta t}^2 + Q_{\Delta t}^2}{U_{НОМ}^2} R_T \Delta t + \Delta P_X \Delta t = \\ &= \frac{S_{\Delta t}^2}{S_{НОМ}^2} \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} R_{Л6-10} \Delta t + \frac{S_{\Delta t}^2}{S_{НОМ}^2} \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} R_T \Delta t + \Delta P_X \Delta t = \\ &= k_{\Delta t}^2 \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} (R_{Л6-10} + R_T) \Delta t + \Delta P_X \Delta t. \end{aligned} \quad (2)$$

Определим значение  $k_{\Delta t}$ , при котором величина относительных потерь в сети  $\Delta W_{6-10}$  будет минимальной:

$$\Delta W_{6-10} = k_{\Delta t} \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} (R_{Л6-10} + R_T) \Delta t + \frac{\Delta P_X}{k_{\Delta t}} \Delta t; \quad (3)$$

$$\frac{\Delta W_{6-10}}{k_{\Delta t}} = \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} (R_{Л6-10} + R_T) \Delta t - \frac{\Delta P_X}{k_{\Delta t}^2} \Delta t = 0; \quad (4)$$

$$k_{\Delta t} = \frac{U_{НОМ}}{S_{НОМ}} \sqrt{\frac{\Delta P_X}{R_{Л6-10} + R_T}} \quad (5)$$

или

$$k_{\Delta t} = \sqrt{\frac{\Delta P_X}{P_{Л6-10} \frac{S_{НОМ}^2}{U_{НОМ}^2} + \Delta P_X}}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что оптимальное значение (минимум) относительные технические потери электроэнергии в сети 6–10 кВ будут иметь в том случае, если потери холостого хода в силовых трансформаторах сети равны суммарным нагрузочным потерям в линиях и трансформаторах 6–10 кВ.

Обозначим  $k_{\Delta t}$  в формуле (6) через  $k_{6-10}$  и сравним его с оптимальным значением коэффициента загрузки трансформаторов  $k_{\Delta t}$  [2], примерно равным 40 %. Анализ показывает, что значение  $k_{6-10}$  всегда будет меньше  $k_{\Delta t}$ , то есть меньше 40 %, так как в знаменателе формулы (6) появились нагрузочные потери электроэнергии в линиях 6–10 кВ, а в знаменателе формулы для расчета  $k_{\Delta t}$  трансформаторов их нет. Подтвердим сказанное численными расчетами.

Примем  $R_{Л6-10} = 0,6$  Ом,  $S_{НОМ} = 100$  кВ,  $\Delta P_X = 0,27$  кВт,  $\Delta P_X = 1,97$ ,  $k_{\Delta t} = 0,37$ . Тогда для линии 6–10 кВ согласно (6)

$$k_{6-10} = \sqrt{\frac{0,27}{0,6 \frac{100^2}{10^2} \cdot 10^{-3} + 1,97}} = \sqrt{\frac{0,27}{0,06 + 1,97}} = 0,364;$$

$$k_{6-10} = 0,364 < k_{3\Delta T} = 0,370.$$

Процент технических потерь электроэнергии в сети 6–10 кВ  $\Delta W_{6-10} \%$  стал больше, чем в трансформаторах:

$$\Delta W_{6-10} \% = \frac{2\Delta P_x T 10^2}{P_{26-10} T + 2P_x T}, \quad (7)$$

где  $P_{26-10} = k_{6-10} S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 = 0,364 \cdot 100 \cdot 0,8 = 29,12$  кВт.

$$\Delta W_{6-10} \% = \frac{2 \cdot 0,27 \cdot 10^2}{29,12 + 0,54} = 1,82\%; \quad (8)$$

$$\Delta W_{6-10} \% = 1,82 > \Delta W_T \% = 1,80.$$

Из приведенных анализа и расчетов видно, что величина  $k_{6-10}$  в значительной мере зависит от величины активных сопротивлений и сопротивлений трансформаторов, которые характеризуют структуру (разветвленность и протяженность) исследуемой сети. В приведенном выше примере  $R_{\text{л}6-10} = 0,6$  Ом ( $F = 50$  мм<sup>2</sup>), а  $R_T = 19,7$  Ом. На практике активные сопротивления линий могут значительно превышать сопротивления трансформаторов, что будет приводить к снижению оптимальной загрузки сети 6–10 кВ и наоборот.

Так, при  $k_{6-10} = 0,3$   $\Delta W_{6-10} \% = 2,2$  %;  
 при  $k_{3\Delta T} = 0,2$   $\Delta W_{6-10} \% = 3,26$  %;  
 при  $k_{3\Delta T} = 0,1$   $\Delta W_{6-10} \% = 6,32$  %.

### Расчет технических потерь электроэнергии при совместном расчете электрических сетей 0,38–6–10 кВ

В распределительных электрических сетях 0,38–6–10 кВ суммарные технические потери электроэнергии  $\Delta W_{0,38-10}$  равны

$$\Delta W_{0,38-10} = \Delta W_{\text{л}6-10} + \Delta W_{\text{л}0,38} + \Delta W_{\text{нт}} + \Delta W_x, \quad (9)$$

где  $\Delta W_{\text{л}0,38}$  – нагрузочные потери электроэнергии в линиях 0,38 кВ.

По аналогии с сетями 6–10 кВ оптимальное значение коэффициента загрузки сети 0,38–10 кВ, при котором величина относительных технических потерь  $\Delta W_{0,38-10}$  будет минимальной, определится следующим образом:

$$k_{0,38-10} = \sqrt{\frac{\Delta P_x}{R_{\text{л}6-10} + R_{\text{л}0,38} \left( \frac{U_{\text{ном}}^{6-10}}{U_{\text{ном}0,38}} \right)^2 + R_T}}, \quad (10)$$

где  $U_{\text{ном}}^{6-10}$  – номинальное напряжение сети (для сети 6 кВ  $U_{\text{ном}}^{6-10} = 6$ , для сети 10 кВ  $U_{\text{ном}}^{6-10} = 10$ );  $R_{\text{л}0,38}$  – активное сопротивление линии 0,38 кВ (в примере  $R_{\text{л}6-10} = 0,6$  Ом,  $R_{\text{л}0,38} = 0,79$  Ом).

Из анализа формул (5) и (10) видно, что коэффициент загрузки  $k_{0,38-10}$  будет меньше  $k_{6-10}$  – в знаменателе формулы (10) дополнительно появились потери активной мощности в линиях 0,38 кВ:

$$k_{0,38-10} = \frac{10}{100} \sqrt{\frac{0,27}{0,6 + 0,79 \left( \frac{10}{0,38} \right)^2 + 19,7}} = 0,021.$$

Действительно, коэффициент загрузки сети 0,38–10 кВ по сравнению с коэффициентом загрузки сети 6–10 кВ и трансформаторов резко снизился:

$$k_{0,38-10} = 0,021 < k_{6-10} = 0,364 < k_{3\Delta T} = 0,370,$$

а общий процент потерь в сети

$$\Delta W_{0,38-10} = \frac{2 \cdot 0,27 \cdot 10^2}{0,021 \cdot 100 \cdot 0,8 + 0,27}$$

сильно вырос:

$$\Delta W_{0,38-10} = 27\% > \Delta W_{6-10} = 1,82\% > \Delta W_T = 1,80\%.$$

Из этого следует важнейший вывод: в электрической сети 0,38–6–10 кВ оптимальный коэффициент загрузки, определяющий минимальный уровень относительных технических потерь в ней, зависит от конфигурации сети и ее конструктивного исполнения. При этом основное влияние на величину суммарных технических потерь электроэнергии оказывают сети 0,38 кВ – потери в них, как правило, больше потерь в сети 6–10 кВ в несколько или даже в десятки раз. Потери в сети 0,38 кВ значительно снижают величину обобщенного коэффициента загрузки сети  $k_{0,38-10}$  и увеличивают уровень относительных технических потерь.

### Оценка оптимальных уровней относительных технических потерь электроэнергии в распределительных сетях 0,38–6–10 кВ в условиях эксплуатации

Разработанные теоретические положения и формулы для оценки и анализа загрузки распределительных электрических сетей и уровня оптимальных технических потерь предназначены для их практического применения в условиях эксплуатации. Разница будет заключаться только в том, что на практике вместо единичных значений  $R_{\text{л}}$  и  $R_T$  следует использовать обобщенные (эквивалентные) значения активных сопротивлений линий 6, 10 и 0,38 кВ и трансформаторов 6(10)/0,4 кВ:

$r_3$  – индивидуальное эквивалентное сопротивление линейных участков распределительной линии (РЛ);  
 $r_{36-10}$  – эквивалентное сопротивление линии 6–10 кВ;  
 $r_{3T}$  – индивидуальное эквивалентное сопротивление трансформаторов 6(10)/0,4 кВ;  
 $r_{30,38}$  – эквивалентное сопротивление распределительных линий 0,38 кВ;

$R_3$  – обобщенные эквивалентные сопротивления всех линий 6–10 и 0,38 кВ и трансформаторов исследуемой сети РЭС или филиала электрической сети (согласно электросетевой инфраструктуре Республики Беларусь) –  $R_{36-10}$ ;  $R_{3T}$ ;  $R_{30,38}$ .

Оперативно и приближенно данные показатели можно рассчитать по формулам [1]

$$r_{6-10} = \frac{\sum_{i=1}^m S_{ном i}^2 r_{ли}}{S_{номРЛ}^2} \quad (11)$$

$$r_{эт} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ном i}^2 r_{тj}}{S_{номРЛ}^2} \quad (12)$$

$$r_{эл0,38} = \frac{\Delta P_{рлi}}{3I_{рлi}^2} \quad (13)$$

$$R_{эл6-10} = \frac{\sum_{i=1}^M S_{номРЛi}^2 r_{эл6-10}}{S_{номс}^2} \quad (14)$$

$$R_{эл0,38} = \frac{\Delta P_{рл}}{3I_c^2} \quad (15)$$

$$R_{эт} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{номj}^2 r_{этj}}{S_{номс}^2} \quad (16)$$

где  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформаторов, подключенных к  $i$ -му участку линии 6–10 кВ с сопротивлением  $r_{ли}$ ;  $S_{номi}$  – номинальная мощность системного трансформатора сопротивлением  $r_{тj}$ ;  $m$  – число линейных участков в схеме РЛ;  $M$  – общее количество распределительных линий 6(10) кВ;  $n$  – общее количество трансформаторов в схеме РЛ;  $N$  – общее число трансформаторов в сети;  $\Delta P_{рлi}$  – потери активной мощности в  $i$ -й схеме линии 0,38 кВ;  $I_{рлi}$  – среднее значение тока  $i$ -й линии;  $\Delta P_{рл}$  – суммарные потери активной мощности в сети 0,38 кВ;  $I_c$  – среднее значение фазного тока в сети 0,38 кВ.

Более точно значения эквивалентных сопротивлений можно определить по результатам фактического расчета технических потерь электроэнергии в электрической сети РЭС (пример расчета приведен ниже).

С учетом принятых выше обозначений основные расчетные формулы для вычисления  $k_{\Delta W}^{0,38-10}$  по сети в целом будут выглядеть следующим образом:

$$k_{\Delta W}^{0,38-10} = \frac{U_{ном}^{6-10}}{S_{номс}} \sqrt{\frac{\Delta W_{уп}}{\left[ R_{эл6-10} + R_{эл0,38} \left( \frac{U_{ном}^{6-10}}{U_{ном}^{0,38}} \right) + R_{эт} \right] T}} \quad (17)$$

или

$$k_{\Delta W}^{0,38-10} = \frac{U_{ном}^{6-10}}{S_{номс}} \sqrt{\frac{\Delta W_{уп}}{R_{эс} T}} \quad (18)$$

где  $\Delta W_{уп}$  – условно-постоянные потери электроэнергии в сети 0,38–10 кВ [1];  $R_{эс}$  – эквивалентное сопротивление всей сети (знаменатель формулы (17)).

Практическое применение разработанных теоретических положений показано ниже (пример разработан по результатам расчета одного из районов электрических сетей Республики Беларусь).

Необходимые исходные данные взяты из результатов расчета и анализа структуры нормативных потерь электроэнергии в сетях 0,38–10 кВ РЭС за 2013 год:

$S_{ном} = 58512$  кВА;  $W_p = 40860,749$  тыс. кВт·ч;  $\text{tg}\varphi = 0,7714$ ;  $k_\varphi = 1,116$ ;  $T = 87602$ ;  $\Delta W_{уп} = 1609,350$  тыс. кВт·ч;  $\Delta W_{нт} = 57,818$  тыс. кВт·ч;  $\Delta W_{нт}^{10} = 378,834$  тыс. кВт·ч;  $\Delta W_{нт}^{0,38-10} = 2780,100$  тыс. кВт·ч;  $\Delta W_{нт} = 2470$  тыс. кВт·ч – нагрузочные потери в трансформаторах тока;  $\Delta W_n = 3253,112$  тыс. кВт·ч – суммарные нагрузочные потери в сети 0,38–10 кВ;  $\Delta W_{рз} = \Delta W_{уп} + \Delta W_n = 4862,462$  тыс. кВт·ч;  $\Delta W_{э} = (4862,462/40860,849)10^2 = 11,9\%$ .

Структурный алгоритм оценки оптимального уровня потерь электроэнергии в электрической сети 0,38–10 кВ РЭС и резервов по их снижению следующий:

1. Определяем оптимальное значение (минимум) суммарных технических потерь электроэнергии  $\Delta W_{онт}$  в сети 0,38–10 кВ РЭС в именованных единицах:

$$\Delta W_{онт} = 2\Delta W_{уп} = 2 \cdot 1609,360 = 3218,700 \text{ тыс. кВт·ч.}$$

2. Определяем оптимальную величину  $\Delta W_{онт}$  в относительных единицах:

$$\Delta W_{онт} \% = (\Delta W_{онт} / W_p) 10^2 = (3218,700/40860,749)10^2 = 7,88\%$$

3. Годовой резерв по снижению потерь электроэнергии  $\delta\Delta W_t$  составляет  $\delta\Delta W_t = \Delta W_{рз} - \Delta W_{онт} = 4862,462 - 3218,700 = 1643,762$  тыс. кВт·ч в именованных единицах, или  $\delta\Delta W_t = (1643,762/4862,462)10^2 = 4,02\%$  от величины  $W_p$ , или  $(1643,762/4862,462)10^2 = 33,80\%$  – от годового значения  $\Delta W_{рз}$ .

4. Вычисляем обобщенные эквивалентные сопротивления сети 6–10 кВ:

$$R_x = \frac{\Delta W_n \cdot 10^2}{W_p^2 (1 + \text{tg}^2\varphi) k_\varphi^2} =$$

$$= \frac{3253,112 \cdot 10^2 \cdot 8760}{40860,749^2 (1 + 0,771^2) \cdot 1,116^2} = 0,859 \text{ Ом;}$$

$$R_{эт} = \frac{57,818 \cdot 10^2 \cdot 8760}{40860,749^2 (1 + 0,771^2) \cdot 1,116^2} = 0,015 \text{ Ом;}$$

$$R_n^{10} = \frac{378,834 \cdot 10^2 \cdot 8760}{40860,749^2 (1 + 0,771^2) \cdot 1,116^2} = 0,100 \text{ Ом;}$$

$$R_{эл0,38} = \left( \frac{U_{ном}^{10}}{U_{ном}^{0,38}} \right)^2 \frac{2780,1 \cdot 10^2 \cdot 8760}{40860,749^2 (1 + 0,771^2) \cdot 1,116^2} = 0,740 \text{ Ом.}$$

5. Вычисляем  $k_{\Delta W}^{0,38-10}$  по формуле

$$k_{\Delta W}^{0,38-10} = \frac{10}{5812 \cdot 1,118} \sqrt{\frac{1609,350 \cdot 10^6}{0,859 \cdot 8760}} = 0,079, \text{ или } 7,9\%;$$

$$k_{\Delta W}^{0,38-10} = 7,9 \cdot 1,116 = 8,8\%$$

## Выводы

1. При постоянном составе оборудования сети оптимальное значение (минимум) суммарных относительных технических потерь электроэнергии в электрической сети 0,38–6–10 кВ достигается при равенстве условно-постоянных и переменных (нагрузочных) потерь в сети и в именованных единицах за период  $T$  равен удвоенной величине условно-постоянных потерь.

2. Оптимальная нагрузка трансформаторов определяется их техническими характеристиками, примерно равна 40 % и соответствует относительно небольшому значению минимальных потерь – 1,73 %.

3. В целом по сети 0,38–10 кВ оптимальный коэффициент загрузки  $k_{\Delta W}^{0,38-10}$  в значительной мере зависит от ее конфигурации и конструктивного исполнения и всегда будет меньше 40 %, при этом чем больше разветвленность сети, тем меньше будут ее эквивалентные сопротивления и тем больше будет значение  $k_{\Delta W}^{0,38-10}$ .

4. Основное влияние на формирование и величину суммарных потерь электроэнергии в сети 0,38–10 кВ оказывают сети 0,38 кВ: потери в них при прочих равных условиях, как правило, больше потерь в сети 10 кВ в несколько (в примере в 7,23 раза) или даже в десятки раз. Потери в сети 0,38 кВ сильно снижают величину обобщенного коэффициента  $k_{\Delta W}^{0,38-10}$  (загрузку сети) и увеличивают оптимальное значение потерь в сети 0,38–10 кВ. При этом оптимальные суммарные потери в сети в именованных единицах не меняются.

5. Приведенный в статье структурный алгоритм анализа технических потерь электроэнергии в сети 0,38–10 кВ позволяет оценить фактическую и оптимальную загрузки сети, определить технический минимум и резервы по снижению потерь, однако часто обеспечивается только в условиях очень незначительной загрузки линий и трансформаторов, поэтому минимум относительных технических потерь не следует принимать в качестве окончательного критерия оптимального состояния сети, которое в конечном итоге должно оцениваться исходя из экономических соображений, например, по минимальной стоимости передачи электрической энергии.

#### Список литературы

1. Фурсанов, М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М.И. Фурсанов. – Минск: Белэнергосбережение, 2005. – 207 с.
2. Фурсанов, М.И. Оптимальные технические потери электроэнергии в силовых трансформаторах распределительных электрических сетей / М.И. Фурсанов // Энергетическая стратегия. – 2016. – № 2. – С. 42–45.