

УДК 621.315

**ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И
ТРАНСФОРМАТОРАХ**

**POWER LOSSES IN POWER TRANSMISSION LINES AND
TRANSFORMERS**

Е.В. Матус

Научный руководитель – В.В. Макаревич, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
elsyst@bntu.by

E. Matus

Supervisor – V. Makarevich, Senior Lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** В данной статье представлены причины потерь мощности в линиях электропередач и трансформаторах. Потери активной и реактивной мощности отражены соответствующими формулами. На основании формул приведены основные мероприятия по снижению потерь мощности в линиях электропередач и трансформаторах с целью оптимизации электрических сетей.*

***Abstract:** This article presents the causes of power losses in power lines and transformers. The losses of active and reactive power are reflected by the corresponding formulas. Based on the formulas, the main measures to reduce power losses in power transmission lines and transformers are given in order to optimize electrical networks.*

***Ключевые слова:** потери, активная мощность, реактивная мощность, линии электропередач, трансформаторы.*

***Key words:** losses, active power, reactive power, power lines, transformers.*

Введение

На пути передачи электрической энергии от электростанции до потребителя неизбежно возникают потери энергии. Значительная доля потерь приходится на проводники линий электропередач, а также обмотки и стальные сердечники силовых трансформаторов.

Основной задачей при проектировании электрической связи электрогенерирующего источника с потребителем является уменьшение потерь мощности и энергии на всех участках энергосистемы. Это обусловлено тем, что потери ведут к увеличению мощности электростанции, что в свою очередь влияет на себестоимость электроэнергии [1].

Основная часть

В общем случае потери активной мощности на участке ЛЭП определяются по формуле 1 [2]:

$$\Delta P = \Delta P_x + \Delta P_n, \quad (1)$$

где ΔP_x и ΔP_n – соответственно потери мощности холостого хода и нагрузочные потери в ЛЭП, кВт.

Потери холостого хода вызваны протеканием тока утечки из-за несовершенства изоляции, а также вследствие коронирования проводников воздушных линий (ВЛ). При напряжении до 110 кВ этими потерями пренебрегают. Тогда расчет проводится только по нагрузочным потерям.

Если нагрузка линии заданы в виде тока, мощность, теряемая в активном сопротивлении трехфазной линии расходуемая на ее нагрев, определяется по формуле 2 [3]:

$$\Delta P = 3I^2 R \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где ΔP – потери активной мощности, кВт;
 I – расчетный ток на участке линии, А;
 R – активное сопротивление линии, Ом.

При представлении нагрузки линии полной мощностью S ток вычисляется по формуле 3:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (3)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение ВЛ, кВ.

Подставив формулу 3 в формулу 2, получим (формула 4):

$$\Delta P = \frac{S^2}{U_{ном}^2} R \cdot 10^{-3} = \frac{S^2 + Q^2}{U_{ном}^2} R \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

Следствие формулы 4 представим на рисунке 1.

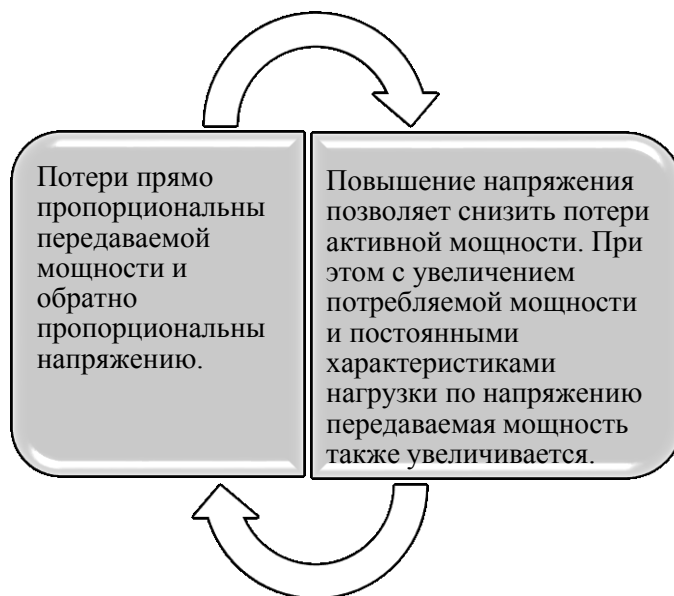


Рисунок 2– Следствие из формулы потерь активной мощности в ЛЭП

В воздушных линиях 330 кВ и выше необходимо учитывать потери мощности на корону (формула 5):

$$\Delta P_{гр} = \Delta P_{у.гр} L \left(-5,88 \frac{U}{U_{ном}} + 6,88 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \right), \quad (5)$$

где $\Delta P_{у.гр}$ – удельные среднегодовые потери активной мощности на корону ВЛ при номинальном напряжении, кВт/км;

L – длина ВЛ, км;

U – рабочее напряжение ВЛ, кВ.

При повышении напряжения можно заметить взаимосвязь, представленную на рисунке 2.

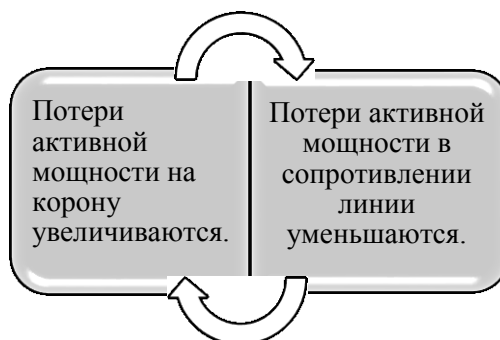


Рисунок 3 – Следствие формулы 5 в условиях повышения напряжения

При проектировании воздушных ЛЭП потери мощности на корону стремятся свести к нулю, выбирая такой диаметр провода, когда возможность возникновения короны практически отсутствует.

Для кабелей высокого напряжения потери активной мощности, вызванные токами утечки через изоляцию, можно рассчитать по их активной проводимости по формуле 6:

$$\Delta P_g = U^2 g, \quad (6)$$

где g – активная проводимость, См.

Наряду с потерями активной мощности, в линиях электропередачи теряется также реактивная мощность. Эти потери обусловлены индуктивными сопротивлениями воздушных и кабельных линий.

Если нагрузка линии задана током, то потери реактивной мощности можно найти по формуле 7:

$$\Delta Q = 3I^2 X \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

где X – индуктивное сопротивление линии, Ом.

Для нагрузки, заданной мощностью, потери реактивной мощности в линии можно рассчитать по формуле 8:

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U_{\text{ном}}^2} X \cdot 10^{-3} = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{ном}}^2} X \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

В силовых трансформаторах потери мощности включают потери, зависящие и не зависящие от нагрузки. Пути определения мощности в обмотках трансформатора представлены на рисунке 3.

по параметрам схемы замещения;

по паспортным данным трансформатора.

Рисунок 4 – Методы определения мощности в обмотках трансформатора

Потери мощности двухобмоточного трансформатора по параметрам схемы замещения определяются по тем же формулам, что и для ЛЭП: потери активной мощности – формулы 2,4; реактивной – формулы 7, 8.

Суммарные активные и реактивные потери в двухобмоточных трансформаторах с учетом потерь в проводимостях представлены в таблице 1.

Таблица 3 Суммарные активные и реактивные потери в двухобмоточных трансформаторах

Формула	Обозначения
$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} r + \Delta P_x = \frac{S^2}{U^2} r + U^2 g$	g – активная проводимость, См.
$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} x + \Delta Q_x$ $= \frac{S^2}{U^2} x + U^2 b$	b – реактивная проводимость, См.

Для трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора в схеме замещения каждая обмотка представляется своим сопротивлением, и потери определяются как сумма потерь мощности каждой из обмоток.

Потери активной и реактивной мощности трансформатора могут быть определены по его паспортным данным и мощности нагрузки. Формулы сведем в таблицу 2.

Таблица 4 – Потери активной и реактивной мощности трансформатора

Формула	Обозначения
$\Delta P = \Delta P_k \beta^2 + \Delta P_x$	ΔP_k – активные потери короткого замыкания, кВт; ΔP_x – активные потери холостого хода трансформатора, кВт; $\beta = S/S_{ном}$ – коэффициент загрузки трансформатора (равен отношению фактической нагрузки трансформатора к его номинальной мощности).
$\Delta Q = \frac{U_k S^2}{100 S_{ном}} + \Delta Q_x$	U_k – напряжение короткого замыкания, в % от номинального; ΔQ_x – реактивные потери холостого хода трансформатора, квар.

При n параллельно работающих одинаковых трансформаторов с суммарной нагрузкой S их эквивалентные сопротивления в n раз меньше, а проводимости в n раз больше. Потери активной и реактивной мощностей находятся соответственно по формулам 9 и 10.

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{\kappa} \beta^2}{n} + n \Delta P_{\chi}; \quad (9)$$

$$\Delta Q = \frac{U_{\kappa} S^2}{n 100 S_{\text{НОМ}}} + n \Delta Q_{\chi}. \quad (10)$$

Потери мощности в сетях определяют с целью их снижения и оптимизации режима электрической сети. Основные мероприятия по снижению потерь в ЛЭП и трансформаторах представлены на рисунке 5 [4].

1. Налаживание контроля выработки и потребления электроэнергии путем установки приборов учета (рисунок 2).

2. Повышение уровня рабочего напряжения (в сетях 330 кВ и выше надо регулировать напряжение с учетом потерь на корону).

3. Быстрый и надежный ремонт сети.

4. Компенсация реактивной мощности для снижения потерь энергии. При этом улучшается режим напряжений. Величина, на которую снижаются потери активной мощности в активном сопротивлении ЛЭП за счет применения средств компенсации, определяется по формуле 13: $\delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2$, (13) где P_1 и P_2 – потери активной мощности соответственно до и после включения компенсирующего устройства.

5. Замена проводов на головных участках сети.

6. Замена недогруженных трансформаторов.

7. Установка вольтдобавочных трансформаторов в замкнутых контурах электрической сети.

8. Применение трансформаторов с регулированием под нагрузкой (РПН). Трансформаторы с РПН имеют большее число регулировочных ступеней и более широкий диапазон регулирования (до $\pm 16\%$). У трансформаторов устройства РПН обычно включаются со стороны нейтрали, что позволяет выполнять их с пониженной на класс напряжения изоляцией.

Рисунок 5 – Мероприятия по снижению потерь в ЛЭП и трансформаторах

Заключение

Таким образом, расчет потерь мощности в линиях электропередач и трансформаторах проводится по рассмотренным формулам. По данным формулам выявлены зависимости, на основании которых предложены мероприятия по снижению потерь мощности и энергии в ЛЭП и трансформаторах. Данные мероприятия обеспечивают уменьшение себестоимости электроэнергии, экономию топливных, денежных и трудовых ресурсов, повышают качество и надежность передачи энергии и увеличивают срок эксплуатации оборудования.

Литература

1. Определение потерь мощности и электроэнергии в линии и в трансформаторе. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://220blog.ru/pro-raschet/opredelenie-poter-moshhnosti-i-elektroenergii-v-linii-i-v-transformatore.html>. – Дата доступа: 20.03.2021
2. Радкевич В.Н. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие / В.Н. Радкевич, В.Б. Козловская, И.В. Колосова. – Минск: ИВЦ Минфина, 2015. – 109-532 с.
3. Потери мощности и электроэнергии в элементах сети. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pandia.ru/text/78/372/1089.php>. – Дата доступа: 21.03.2021
4. Основные мероприятия по снижению потерь в электрических сетях. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://electricalschool.info/sety/1527-osnovnye-meroprijatija-po-snizheniju.html>. – Дата доступа: 22.03.2021