

Анализ потерь активной мощности в воздушных, кабельных (СПЭ) и газоизолированных ЛЭП высокого напряжения

А. П. Вихарев¹, Н. Г. Репкина²

¹ кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: usr00061@vyatsu.ru

² кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: usr00353@vyatsu.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена тем, что технические потери активной мощности являются одним из важнейших технико-экономических показателей, которые необходимо учитывать при проектировании линии электропередачи. Они имеют место в течение всего времени эксплуатации линий электропередачи, а их стоимость постоянно растет. Поэтому целью исследования является сравнительный анализ потерь активной мощности в воздушных, кабельных (с изоляцией из сшитого полиэтилена) и газоизолированных линиях электропередачи. Ведущим методом исследования является аналитический метод, с помощью которого выполнены расчеты потерь мощности. Материалы статьи могут быть использованы при проектировании и реконструкции электрических сетей высокого напряжения.

Ключевые слова: воздушные ЛЭП, кабельные ЛЭП, газоизолированные ЛЭП, потери активной мощности.

В современных крупных городах, несмотря на экономический кризис, высокими темпами растет потребление электроэнергии. Для удовлетворения потребностей в электроэнергии сетевым компаниям приходится реконструировать существующие сети высокого напряжения, увеличивая пропускную способность линий электропередачи (ЛЭП). Для этого могут использоваться воздушные, кабельные или газоизолированные ЛЭП. При выборе того или иного средства передачи электрической энергии необходимо учитывать целый ряд технических и экономических показателей. Одним из важнейших технико-экономических показателей являются технические потери активной мощности и энергии. Они имеют место в течение всего времени эксплуатации ЛЭП, а их стоимость постоянно растет. Поэтому актуальной является задача сравнения потерь активной мощности указанных средств передачи электроэнергии. Наиболее объективное сравнение ЛЭП возможно при следующих условиях: при одинаковой передаваемой мощности; при одинаковых напряжениях; при одинаковых сечениях токоведущих частей.

Воздушные ЛЭП. Потери активной мощности в воздушной ЛЭП можно определить по формуле

$$\Delta P_{\text{в.л}} = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{ут}} + \Delta P_{\text{кор}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{эл}}$ – потери активной мощности, обусловленные нагревом проводов от электрического тока; $\Delta P_{\text{ут}}$ – потери активной мощности, обусловленные токами утечки через изоляцию проводов; $\Delta P_{\text{кор}}$ – потери активной мощности, обусловленные коронным разрядом на проводах.

Потери активной мощности в проводах можно определить по следующим формулам:

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3 \cdot I_{\text{л}}^2 \cdot R_{\text{л}}; \quad R_{\text{л}} = k_{\text{ст}} \cdot k_{\text{п}} \cdot R_{20} \cdot (1 + a(t_{\text{пр}} - 20)), \quad (2)$$

где $I_{\text{л}}$ – электрический ток в проводах ЛЭП; $R_{\text{л}}$ – активное сопротивление провода; $k_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект в проводах; $k_{\text{ст}}$ – коэффициент, учитывающий потери активной мощности в стальном сердечнике провода; R_{20} – сопротивление провода постоянно-му току при температуре +20 °С; a – температурный коэффициент сопротивления (для алюминия $a = 0,00403 \text{ 1/}^\circ\text{C}$); $t_{\text{пр}}$ – температура провода.

Коэффициент, учитывающий поверхностный эффект для переменного тока, зависит от конструкции провода и соотношения сечений стального сердечника и алюминиевой части. Согласно

отраслевому стандарту [6] указанный коэффициент может быть принят равным 1,05. Коэффициент, учитывающий потери в стальном сердечнике, зависит от числа повивов алюминиевых проволок. Магнитные потери максимальны для проводов с одним повивом и минимальны при четном числе повивов. Это происходит потому, что вследствие противоположного направления скрутки смежных повивов магнитные потоки, создаваемые токами повивов, взаимно компенсируются. В отраслевом стандарте [6] рекомендуется принимать следующие значения коэффициента: $k_{ст} = 1,15$ – для проводов с одним повивом алюминиевых проволок; $k_{ст} = 1,04$ – для проводов с двумя повивами алюминиевых проволок; $k_{ст} = 1,1$ – для проводов с тремя повивами алюминиевых проволок.

Потери активной мощности от токов утечки через изоляцию проводов весьма малы, поэтому в расчетах не учитываются.

Потери активной мощности, обусловленные коронным разрядом на проводах ЛЭП высокого напряжения, можно рассчитать по методике, приведенной в руководящих указаниях Минэнерго СССР [5]. Согласно этой методике оценка потерь на корону производится на основе экспериментально полученных характеристик для разных погодных условий, при различных начальной и максимальной напряженностях электрического поля на поверхности проводов. Выделяют четыре группы погодных условий: хорошая погода; сухой снег; дождь; изморозь. Учитывается продолжительность и вероятность различных групп погоды за год. Затем определяются потери мощности на корону для каждой группы погоды по обобщенным характеристикам потерь на корону θ_i [5]

$$\theta_i = \frac{P_i}{n \cdot r_0^2}, \quad (3)$$

где P_i – потери мощности на корону при i -й группе погоды.

Расчет среднегодового значения потерь мощности на корону для трехфазной линии осуществляется путем суммирования потерь по фазным проводам для каждой группы погоды

$$P_{cp} = r_0^2 (3\theta_{х.п.} \cdot \psi_{х.п.} + 3\theta_{с.с.} \cdot \psi_{с.с.} + 3\theta_{д} \cdot \psi_{д} + 3\theta_{из} \cdot \psi_{из}), \text{ Вт/м}, \quad (4)$$

где $\theta_{х.п.}$; $\theta_{с.с.}$; $\theta_{д}$; $\theta_{из}$ – значения обобщенных потерь на корону для разных групп погоды; $\psi_{х.п.}$; $\psi_{с.с.}$; $\psi_{д}$; $\psi_{из}$ – вероятности разных групп погоды за год.

Расчет потерь активной мощности выполнен для воздушной ЛЭП напряжением 220 кВ с проводами АС-400/93. Параметры проводов приняты следующие [1; 3]: $R_{20} = 0,071$ Ом/км; $d_{np} = 29,1$ мм; $I_{дон} = 1473$ А при $t_{в} = -20$ °С; число повивов – 2; $k_{cm} = 1,04$; $k_n = 1,05$; $t_{дон} = 90$ °С. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов потерь активной мощности для воздушной ЛЭП

Лл, А	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
$\Delta P_{эл}$, Вт/м	2,3	21,8	62,9	128,0	219,0	339,0	489,0	672,0
$\Delta P_{кор}$, Вт/м	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
$\Delta P_{вл}$, Вт/м	3,9	23,4	64,5	129,6	220,6	340,6	490,6	673,6

Кабельные ЛЭП. Современная кабельная линия (КЛ) выполняется из трех одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Каждый кабель состоит из изолированных друг от друга токоведущей жилы и экрана, а также внешней оболочки экрана. Жилы выполняются из алюминиевых или медных проволок, а экраны – из медных проволок. Потери активной мощности в кабельной ЛЭП могут быть определены по формуле

$$\Delta P_{кл} = \Delta P_{ж} + \Delta P_{э} + \Delta P_{из}, \quad (5)$$

где $\Delta P_{ж}$ – потери активной мощности в токоведущей жиле кабеля; $\Delta P_{э}$ – потери активной мощности в металлическом экране кабеля; $\Delta P_{из}$ – потери активной мощности в изоляции кабеля.

Потери активной мощности в токоведущих жилах кабеля можно определить по формулам

$$\Delta P_{ж} = 3 \cdot I_{ж}^2 \cdot R_{ж}; \quad R_{ж} = k_{п} \cdot R_{ж,20} \cdot (1 + a_{ж}(t_{ж} - 20)). \quad (6)$$

Потери активной мощности в металлических экранах кабелей зависят от способа их заземления. При эксплуатации КЛ используют три способа заземления экранов: заземление одновременно

с обоих концов линии; заземление с одного конца линии; транспозиция экранов. В первом случае экраны образуют замкнутую трехфазную систему, что будет приводить к появлению в них значительных продольных токов. Согласно исследованию, выполненному в работе [3], величина продольного тока будет пропорциональна току в токоведущей жиле, расстоянию между осями фаз и сечению экрана. Для расчета тока в экранах, заземленных с двух концов, можно воспользоваться формулами, выведенными в указанной работе [3]. При заземлении экранов с двух концов КЛ потери в них определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{Э}} = 3 \cdot I_{\text{Э}}^2 \cdot R_{\text{Э}}; \quad (7)$$

При заземлении экранов КЛ с одного конца или при транспозиции экранов продольные токи не возникают, поэтому потерь мощности не будет.

Потери активной мощности в изоляции кабеля можно рассчитать по формулам:

$$\Delta P_{\text{из}} = 3 \cdot (U_{\text{ном}}/\sqrt{3})^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{и}} \cdot \text{tg}(\delta_{\text{и}}); \quad C_{\text{и}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (8)$$

где $C_{\text{и}}$ – электрическая емкость изоляции; $\text{tg}(\delta_{\text{и}})$ – коэффициент диэлектрических потерь в изоляции; r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы изоляции; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Расчеты потерь активной мощности выполнены для КЛ напряжением 220 кВ, состоящей из трех одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена АПвП2г 1*400/265. В расчетах приняты следующие параметры кабелей [4]: диаметр жилы – 22,6 мм; диаметр изоляции – 72,6 мм; диаметр кабеля – 92,3 мм; толщина защитной оболочки – 4,0 мм; $R_{\text{ж},20} = 0,0778$ Ом/м; $R_{\text{э},20} = 0,088$ Ом/м; $\epsilon = 2,4$; $\text{tg}(\delta_{\text{и}}) = 0,001$. Кабели проложены в воздухе, «в ряд», расстояние между кабелями «в свету» равно диаметру кабеля. Рассмотрены два случая: заземление экранов с двух концов КЛ и заземление экранов с одного конца КЛ. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов потерь активной мощности для кабельной ЛЭП

$I_{\text{ж}}, \text{А}$	100	300	500	700	900	Примечание
$I_{\text{э}}, \text{А}$	85	255	425	595	765	
$\Delta P_{\text{ж}}, \text{Вт/м}$	2,42	23,6	70,4	147,6	259,7	
$\Delta P_{\text{э}}, \text{Вт/м}$	3,3	31,0	89,4	184,8	321,3	
$\Delta P_{\text{из}}, \text{Вт/м}$	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	
$\Delta P_{\text{кл}}, \text{Вт/м}$	7,4	56,3	161,5	334,1	582,7	Заземление экранов с двух концов КЛ
$\Delta P_{\text{кл}}, \text{Вт/м}$	4,2	25,3	72,1	149,3	261,4	Заземление экранов с одного конца КЛ

Газоизолированные ЛЭП. Газоизолированные ЛЭП (ГИЛ) конкурируют с КЛ при осуществлении глубоких вводов мощности в крупные города и промышленные центры, а также подземных врезок в воздушные ЛЭП. В западной Европе и США ГИЛ эксплуатируются уже в течение 40 лет. В России ГИЛ рассматриваются как перспективные проекты модернизации электроэнергетических систем Москвы и Санкт-Петербурга [1]. Современная ГИЛ имеет коаксиальную конструкцию, в которой токоведущий проводник под высоким напряжением поддерживается неподвижными опорными изоляторами в центре заземленной оболочки. Пространство между проводником и оболочкой заполнено смесью элегаза и азота под избыточным давлением. Для ГИЛ второго поколения применяется газовая смесь, состоящая из 20...40% элегаза и соответственно из 80...60% азота. Для достижения высокой электропроводности токоведущий проводник обычно выполняется в виде алюминиевой трубы, а поддерживающая давление газа оболочка – из алюминиевого сплава [1].

Потери активной мощности в ГИЛ можно определить по формуле

$$\Delta P_{\text{ГИЛ}} = \Delta P_{\text{ТВЧ}} + \Delta P_{\text{ОБ}} + \Delta P_{\text{ЭИ}}, \quad (9)$$

где $\Delta P_{\text{ТВЧ}}$ – потери активной мощности в токоведущих частях ГИЛ; $\Delta P_{\text{ОБ}}$ – потери активной мощности в оболочках ГИЛ; $\Delta P_{\text{ЭИ}}$ – потери активной мощности в газовой изоляции ГИЛ.

Принимая во внимание схожесть конструкций однофазного кабеля и фазы ГИЛ, потери активной мощности в токоведущих частях, оболочках и изоляции ГИЛ можно рассчитать по формулам (6, 7, 8). Потери активной мощности в изоляции ГИЛ из-за их незначительности в расчетах не учитываются.

Расчеты потерь выполнены для ГИЛ напряжением 220 кВ компании «CGIT Westboro». В расчетах приняты следующие размеры и параметры ГИЛ [1]: номинальное напряжение – 220 кВ; внешний диа-

метр токоведущего проводника – 102 мм; толщина токоведущего проводника – 12,7 мм; внешний диаметр оболочки – 307 мм; толщина оболочки – 7,6 мм; расстояние между центрами токоведущих проводников – 500 мм; $a_{\text{твч}} = 0,00403 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $a_{\text{об}} = 0,0049 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $R_{\text{твч.20}} = 0,0109 \text{ Ом/км}$; $R_{\text{об.20}} = 0,009 \text{ Ом/км}$. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

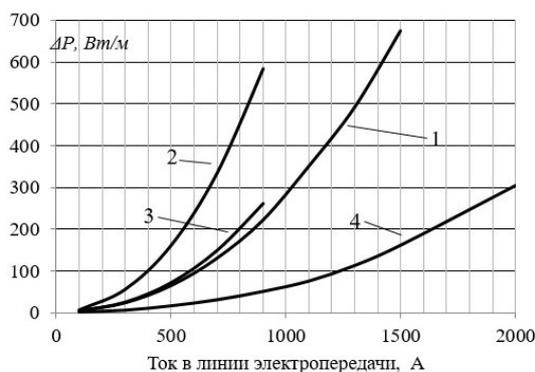
Таблица 3

$I_{\text{твч}}, \text{ А}$	100	500	1000	1500	2000
$I_{\text{об}}, \text{ А}$	98	490	980	1470	1960
$\Delta P_{\text{твч}}, \text{ Вт/м}$	0,33	8,55	37,5	91,8	175,2
$\Delta P_{\text{об}}, \text{ Вт/м}$	0,26	6,9	28,5	69,5	129,6
$\Delta P_{\text{гил}}, \text{ Вт/м}$	0,59	15,5	66,0	161,3	304,8

Сравнение результатов расчетов, рассмотренных средств передачи электрической энергии, представлено на рисунке ниже. Из рисунка видно, что наименьшие потери мощности будут иметь место у ГИЛ. При небольших токах они в 6,5 раза меньше, чем для воздушных ЛЭП, и в 4,5 раза меньше, чем для КЛ. При больших токах потери в ГИЛ в 4 раза меньше, чем для воздушных ЛЭП, и в 5 раз меньше, чем для КЛ. Но такое значительное снижение потерь мощности в ГИЛ достигается за счет увеличения площади поперечного сечения токоведущих частей и оболочек, а следовательно, большого расхода цветного металла и высокой стоимости сооружения ГИЛ.

Выводы

1. Величина потерь активной мощности в КЛ в значительной степени зависит от способа заземления экранов кабелей. Для снижения потерь нужно выполнять заземление экранов с одного конца КЛ или выполнять транспозицию экранов.
2. Потери активной мощности для воздушных и кабельных (при заземлении экранов с одного конца) ЛЭП, при одинаковых условиях прокладки, приблизительно равны.
3. Потери активной мощности в ГИЛ значительно меньше, чем в воздушных и кабельных ЛЭП.



Зависимости потерь мощности от тока в линиях электропередачи:

- 1 – для воздушной ЛЭП; 2 – для кабельной ЛЭП (при заземлении экранов с двух концов КЛ);
3 – для кабельной ЛЭП (при заземлении экранов с одного конца КЛ); 4 – для газоизолированной ЛЭП

Список литературы

1. Бударгин О. М., Мисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Перспективы применения газоизолированных линий в современных электропередачах высокого и сверхвысокого напряжения // Электро. 2011. № 1. С. 2–9.
2. ГОСТ 839-80 Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200008421> (дата обращения: 9.01.2017).
3. Дмитриев М. В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2010. 154 с.
4. Каталог продукции группы компаний «Севкабель», силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на 110 кВ и выше. URL: <http://www.sevcable.ru/catalog/mark?id=1093&categoryId=292&industryId=327>
5. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750 кВ и постоянного тока 800-1500 кВ. РД 34.20.172, МинЭиЭ СССР, 1974. 26 с.
6. СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. Введ. 2013-13-02. 67 с.

Analysis of active power losses in air, cable (SPE) and gas-insulated high-voltage power lines

A. P. Vikharev¹, N. G. Repkina²

¹ PhD of technical sciences, associate professor of the Department of electric power systems, Vyatka State University, Russia, Kirov. E-mail: usr00061@vyatsu.ru

² PhD of technical sciences, associate professor of electric power systems Department, Vyatka State University, Russia, Kirov. E-mail: usr00353@vyatsu.ru

Abstract: The relevance of the study due to the fact that technical losses of active power are one of the most important technical and economic indicators that must be considered when designing transmission lines. They take place during the entire time of operation of transmission lines and their cost is growing. Therefore, the aim of the study is a comparative analysis of active power losses in the aerial, XLPE-cable and of gas insulated transmission lines. A leading research method is the analytical method by which the calculations of power losses. The article can be used in the design and reconstruction of electric networks of high voltage.

Keywords: of overhead transmission lines, XLPE-cable transmission lines, gas insulated transmission lines, power losses.

References

1. Budargin O. M., Misrihanov M. SH., Ryabchenko V. N. *Perspektivy primeneniya gazoizolirovannyh linij v sovremennyh ehlektroperedachah vysokogo i sverhвысокoго napryazheniya* [Prospects of application of the gas-insulated lines in modern power transmissions of high and ultrahigh voltage] // *EHlektro – Electro*. 2011, No. 1, pp. 2–9.
2. GOST 839-80 Non-insulated wires for overhead power lines. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200008421> (date accessed: 9.01.2017). (in Russ.)
3. Dmitriev M. V. *Zazemlenie ehkranov odnofaznyh silovyh kabelej 6-500 kV* [Grounding screens of single-phase power cables 6-500 kV]. SPb. Publ. house of Politech. Un-ty. 2010. 154 p.
4. *Katalog produkcii gruppy kompanij «Sevkabel», silovye kabeli s izolyaciej iz sshitogo poliehtilena na 110 kV i vyshe* – Product catalog of the group of companies "Sevkabel", power cables with insulation of cross-linked polyethylene on 110 kV and above. Available at: <http://www.sevcable.ru/catalog/mark?id=1093&categoryId=292&industryId=327>
5. Guidelines for the consideration of corona losses and interference from the crown when you select the wire of overhead transmission lines of alternating current 330-750 kV and DC 800–1500 sq RD 34.20.172, Min. of Energy and Electricity USSR. 1974. 26 p. (in Russ.)
6. STO 56947007-29.240.55.143-2013. The method of calculation of the current load limits under the conditions of preservation of mechanical strength of wires and permissible dimensions of overhead lines. Introd. 2013-13-02. 67 p. (in Russ.)