



COMPARISON OF THE RESULTS OF CALCULATING CAPACITY ALLOCATION AND NATURAL POWER ACCORDING TO VARIOUS METHODS

Vitaly POSTOLATY, Irina GOLUB

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract - Selection of the parameters and appropriate technical solutions of overhead electric lines OEL is defined firstly by assurance of transmission capacity of the overhead line, value of which is determined by a large number of different factors. The goal of the study is to select the most relevant of them and prove their feasibility. Various options of the expressions of traffic's capacity which reflecting various relevant factors have been treated in the article.

Keywords - the capacity of the overhead line, the transmit power, the wave resistance of the line, the specific resistance of the wires.

COMPARAREA REZULTATELOR DE CALCUL A CAPACITĂȚII DE TRAFIC ȘI PUTERII NATURALE PRIN DIFERITE METODE

Vitali POSTOLATI, Irina GOLUB

Institutul de Energetica al Academiei de Stiinte a Moldovei

Rezumat – Selectarea parametrilor și a soluțiilor tehnice corespunzătoare a LEA este determinată, în primul rând, de asigurarea capacității de trafic a liniei aeriene, a cărei valoare este determinată de un număr mare de diferiți factori. Sarcina constă în selectarea celor mai influenți (cu impact) dintre ei și argumentarea posibilității de realizare a lor. În articol sunt descrise diferite variante ale expresiilor capacității de trafic, care reflectă diferiți factori de influență.

Cuvinte cheie – capacitatea de trafic a LEA, rezistența de undă a liniei, rezistența activă specifică a conductorilor.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И НАТУРАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ПО РАЗЛИЧНЫМ МЕТОДИКАМ

В.М. Постолатий, И.В. Голуб

Институт энергетики Академии наук Молдовы

Реферат - Выбор параметров и соответствующих технических решений ВЛ связан, прежде всего, с обеспечением заданной пропускной способности ВЛ, величина которой определяется большим числом различных факторов. Задача состоит в том, чтобы выбрать наиболее влияющие из них и обосновать возможность их реализации. В работе рассмотрены различные варианты выражений пропускной способности, отражающих различные влияющие факторы.

Ключевые слова – пропускная способность ВЛ, передаваемая мощность, волновое сопротивление линии, удельное активное сопротивление проводов.

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВЛ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При выборе различных вариантов ВЛ и их пропускной способности, как правило, исходят, прежде всего, от заданной величины передаваемой мощности и дальности передачи.

Величина, передаваемой по ВЛ мощности, определяется выражением:

$$P = \frac{|U_1| \cdot |U_2|}{Z_B \cdot \sin \alpha_0 l} \cdot \sin \delta, \quad (1)$$

где \dot{U}_1, \dot{U}_2 , - вектор напряжения, приложенного в начале линии и в ее конце, соответственно;

δ – угол сдвига векторов напряжений начала и конца линии;

Z_B – волновое сопротивление линии (Ом), определяемое по формуле:

$$Z_B = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}, \quad (2)$$

где $x_0 = \omega L_0$, - удельное индуктивное сопротивление проводов (фаз);

$b_0 = \omega C_0$ – удельная емкостная проводимость проводов (фаз) линии;

r_0 – удельное активное сопротивление проводов (фаз), Ом/км;

g_0 – удельная активная поперечная проводимость проводов (фаз) линии, определяемая выражением:

$g_0 = \Delta P_{\text{короп.сз}} / U_{2\text{ном}}$ (См/км), где $\Delta P_{\text{короп.сз}}$ – среднегодовые потери на корону;

$\alpha_0 l$ – волновая длина линии (электрических градусов);

здесь l – длина линии (км),

α_0 – коэффициент изменения фазы (эл. град./км), определяемый по формуле:

$$\alpha_0 = \pi \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0} \left(1 + \frac{r_0^2}{8x_0^2} \right) \quad (3)$$

При фиксированных значениях напряжения линии, ее длины и волнового сопротивления предельная величина мощности P_m , которую можно передать по линии, достигается при $\sin \delta = 1$, т.е. когда разность углов между векторами напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 достигает 90° . В данном случае выражение (1) примет вид:

$$P_m = \frac{|U_1| \cdot |U_2|}{Z_B \cdot \sin \alpha_0 l}$$

При волновой длине ВЛ, равной 90 эл. град., $\sin \alpha_0 l = 1$, и при равенстве модулей напряжений $|\dot{U}_1|$ и

$|\dot{U}_2|$ выражение (4) принимает вид

$$P_m = \frac{\dot{U}^2}{Z_B} = P_{\text{нам}} \quad (5)$$

которое является выражением натуральной мощности линии. Выражение (5) представляется весьма удобным для сопоставления при заданном классе напряжения различных типов ВЛ, отличающихся друг от друга только волновым сопротивлением.

Анализ различных влияющих факторов показал, что именно благодаря воздействию на величину волнового сопротивления можно изменять при прочих равных условиях характеристики линии и ее режимные параметры. При передаче по линии мощности, равной величине ее натуральной мощности, имеет место режим натуральной мощности линии, характеризующийся практически постоянным уровнем напряжения вдоль линии. Приведенные выражения величины натуральной мощности и волновых параметров могут быть использованы при исследованиях как одноцепных трехфазных ВЛ, так и двухцепных и многоцепных, а также в общем случае многофазных многопроводных линий электропередачи, в зависимости от того, какие первичные параметры будут использоваться.

Как следует из выражения (5) увеличить значение натуральной мощности линии можно за счет уменьшения волнового сопротивления, что может быть достигнуто путем уменьшения удельного индуктивного сопротивления линии (x_0) и соответствующего увеличения удельной емкостной проводимости (b_0), как это следует из выражения (2).

Индуктивное сопротивление многоцепной многопроводной линии определяется геометрическими параметрами линии и векторными соотношениями токов, протекающих по рассматриваемой фазе и остальным фазам, тросам и по «земляному» проводу [10].

Для самого общего случая многопроводной (многофазной) линии электропередачи выражение индуктивности проводов (фаз) имеет следующий вид:

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n_p} + \frac{\sum_{m=1}^n I_m' \ln \frac{r_{i3}}{d_{im}}}{I_i} - \frac{k_z \sum_{m=1}^n I_m' \ln \frac{r_{i3}}{D_3}}{I_i} - \frac{\sum_{p=1}^{n_p} k_{mp} \sum_{m=1}^n I_m' \ln \frac{r_{i3}}{d_{imp}}}{I_i} \right) \quad (6)$$

где L_i – индуктивность i -того провода фазы;

I_i – вектор токов i -том проводе (фазе);

I_m – вектор тока в m -ом проводе (фазе);

r_{i3} – радиус эквивалентного i -го провода (фазы);

d_{im} – расстояние от i -го до m -того провода (фазы);

k_z – доля тока, протекающего по обратному «земляному» проводу;

D_3 – глубина залегания эквивалентного «земляного» провода;

k_{mp} – доля тока, протекающего по тросам;

d_{imp} – расстояние от провода (фазы) i до троса;

n_p – число проводов в расщепленной фазе.

Из выражения (6) при различных условиях могут быть получены выражения индуктивности проводов (фаз) линий различных типов (одноцепных трехфазных, двухцепных, многоцепных, многофазных с произвольными системами токов и геометрическими параметрами проводов и фаз).

Приведенное выражение (5) величины натуральной мощности линии электропередачи является общепринятым и широко используется в практике расчетов. Вместе с тем, в ряде работ приведены другие выражения для определения величины натуральной мощности линии, с выделением влияющих факторов, на которые можно воздействовать для увеличения натуральной мощности линии. Согласно работе [2] величину натуральной мощности трехфазной линии электропередачи можно определять по формуле:

$$P_n = \frac{n \cdot r_0 \cdot E_{\text{дон}} \cdot U_\phi}{20K_n} \quad (7)$$

где n и r_0 – число и радиус составляющих расщепленной фазы;

$E_{\text{дон}}$ – допустимая величина напряженности электрического поля на поверхности проводов;

U_ϕ – фазное напряжение;

K_n – коэффициент неравномерности распределения напряженности электрического поля на поверхности проводов фазы. Выражение (7) наглядно показывает, что величина натуральной мощности линии электропередачи прямо пропорциональна числу проводов, их радиусу, напряжению линии и допустимой величине напряженности электрического поля на поверхности проводов. Путем соответствующего выбора указанных параметров может быть обеспечена любая заданная величина натуральной мощности линии. При заданной допустимой величине напряженности электрического поля ($E_{\text{дон}}$) согласно [11] может быть определен

допустимый суммарный электрический заряд линии по условию ограничения коронного разряда:

$$q_{доп} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot n \cdot r_0 \cdot E_{доп}}{K_n} \quad (8)$$

Другим весьма удобным и наглядным выражением натуральной мощности является выражение, приведенное в работе [12]:

$$P_n = v \cdot U \sum_{i=1}^n q_i \cdot \cos(\gamma_i - \alpha_i), \quad (9)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны;

U – фазное напряжение линии;

q_i – заряд i -го провода (или фазы).

γ_i и α_i – аргументы напряжения $\left(\dot{U}_i\right)$ и тока $\left(\dot{I}_i\right)$,

соответственно. Приведенное выражение наглядно показывает, зависимость величины натуральной мощности многопроводной (многофазной) линии от значений электрических зарядов, которые могут быть созданы на проводах, составляющих фазы и линию в целом. Указанные выражения (7), (9) позволяют выполнить оптимизационные расчеты конфигураций расположения фаз и их конструкций, обеспечивающих максимум функции (P_n), а также определить обобщенные характеристики линий различного типа и провести их сопоставление.

Проведем контрольные расчеты.

Натуральный ток (ток при передаче по ВЛ мощности, равной натуральной) равен:

$$I_{нат.i} = \frac{q_{нат.i}}{\sqrt{\xi \xi_0 \cdot \mu \mu_0}} = q_{нат.i} \cdot v \quad (10)$$

Покажем, чему равен коэффициент v

$$v = \frac{1}{\sqrt{\xi \xi_0 \cdot \mu \mu_0}}, \quad (11)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \xi_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\Phi}{\text{М}} \right] \\ \mu_0 &= 1,256 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\Gamma\text{Н}}{\text{М}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Примем для воздушной среды $\mu = 1$ и $\xi = 1$

Из (11) с учетом (12) находим:

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{11,1 \cdot 10^{-18}}} = \frac{1}{3,33 \cdot 10^{-9}} = \\ &0,3 \cdot 10^9 = 300000000 \left[\frac{\text{М}}{\text{с}} \right] \end{aligned}$$

Или $v = 300000 \left[\frac{\text{км}}{\text{с}} \right]$. Это есть скорость света. Тогда:

$$I_{нат} = q_{инат} \cdot v$$

Натуральная мощность i -той фазы:

$$P_{нат.i} = \dot{U}_i \cdot \dot{I}_{нат.i} \quad (13)$$

или $P_{нат.i} = \dot{U}_i \cdot \dot{g}_{нат.i} \cdot v$,

здесь \dot{U}_i – вектор напряжения i -той фазы,

$\dot{g}_{нат.i}$ – сопряженный вектор заряда i -той фазы.

Запишем (1.2.17) в виде:

$$P_{нат.i} = U_i \cdot q_{нат.i} \cdot \cos(\gamma_i - \alpha_i)$$

где γ_i и α_i аргументы напряжений и токов соответственно.

При совпадении по углу напряжений и токов получим:

$$\cos(\gamma_i - \alpha_i) = \cos 0^\circ = 1$$

Следовательно, для одной i -той фазы будем иметь

$$P_{нат.i} = U_i \cdot q_{нат.i}$$

При количестве фаз (n) и равенстве модулей напряжений фаз

$$P_{нат.i}^\Sigma = v \cdot U \sum_1^n q_{нат.i},$$

Здесь U фазное напряжение [В]

$$v = 300000000 \left[\frac{\text{М}}{\text{с}} \right] \quad q_{нат.i} - \text{заряд фазы} \left[\frac{\text{К}}{\text{М}} \right]$$

Пример

$$U_n = 330 [\text{кВ}]; \quad U_\phi = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{330}{\sqrt{3}} = 190,7 [\text{кВ}]$$

$$z_c = 289 [\text{Ом}]$$

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 3,64 [\text{мкСм} / \text{км}] \\ x_0 &= 0,302 [\text{Ом} / \text{км}] \end{aligned} \right\} \text{ для одной трехфазной цепи}$$

$$P_n^\Sigma = 374 [\text{МВт}] \quad \text{на одну цепь трехфазную,}$$

$$P_{н.фазы} = \frac{374}{3} = 124,6 [\text{МВт}]$$

$$P_n^\Sigma = U_\phi \cdot v \cdot \sum_{i=1}^3 q_i \cos(\gamma_i - \alpha_i)$$

Натуральный ток

$$I_{нат.i} = \frac{q_{нат.i}}{\sqrt{\xi \xi_0 \cdot \mu \mu_0}} = q_{нат.i} \cdot v = 300000000 \cdot q_i$$

$$\text{При } I_{нат} = \frac{124,6 \cdot 10^6}{(330 / \sqrt{3}) \cdot 10^3} = 0,653 \cdot 10^3 [\text{А}]$$

$$g_0 = \frac{I_{нат}}{v} = \frac{0,653 \cdot 10^3}{300000000} = 0,217 \cdot 10^{-5} = 2,17 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{К}}{\text{М}} \right]$$

$$\begin{aligned} P_{нат} &= 300000000 \cdot \frac{330}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \cdot 2,17 \cdot 10^{-6} = \\ &= 1241,79 \cdot 10^5 = 124,1 [\text{МВт}] \end{aligned}$$

Для трех фаз получим:

$$P_{нат}^\Sigma = 124,1 \cdot 3 = 372 [\text{МВт}]$$

Для шести фаз (двухцепная УСВЛ-330)

$$P_{нат} = 744 [\text{МВт}]$$

Попробуем определить q_i из исходных данных

$$b_0 = j\omega C_0 = \left[\frac{\text{СМ}}{\text{км}} \right]; \quad C_0 = \frac{b_0}{j\omega}; \quad C_0 = \frac{q_0}{U_\phi}$$

$$q_0 = C_0 U_\phi [\Phi \cdot \epsilon]$$

При $b_0 = 3.64 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Cm}{\kappa m} \right] = 3.64 \cdot 10^{-9} \left[\frac{Cm}{m} \right]$

$$C_0 = \frac{3.64 \cdot 10^{-9}}{314} \cdot 0.01159 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\Phi}{m} \right]$$

$$q_0 = 0.01159 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{330}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 2.21 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Kл}{m} \right]$$

$$z_B = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{0.302}{3.64 \cdot 10^{-6}}} = \sqrt{\frac{0.302 \cdot 10^6}{3.64}} = 0.288 \cdot 10^3 [Ом]$$

$$P_{фазы} = 300000000 \cdot \frac{330}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \cdot 2,21 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 1264 \cdot 10^5 [ВА] = 126400000 [ВА] = 126,4 [МВА]$$

На три фазы $P_{3\phi} = 126,4 \cdot 3 = 379,2 [МВА]$

На шесть фаз $P_{6\phi} = 126,4 \cdot 6 = 758,4 [МВА]$

Количество электричества (электрический заряд) Q , величина, равная произведению силы тока I на время t , в течение которого протекал ток $Q = I \cdot t \left[\frac{Кл}{c} \right]$.

Кулон равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой 1А за время 1с.

Таблица 1. Результаты выполненных расчётов

Наименование Переменной	Значение Переменной	Единицы измерения	$P = \frac{ U_1 \cdot U_2 }{z_B \cdot \sin(\alpha_0 \cdot l)} \cdot \sin \delta$	$P = \frac{U^2}{z_B}$	$P = \frac{n \cdot r_0 \cdot E_{дон} \cdot U_{\phi}}{20K_n}$	$P = v \cdot U_{\phi} \sum_{i=1}^n q_i \cos(\gamma_i - \alpha_i)$
U1=U2	330	кВ	+	+		
δ	-60	°	+			
ω	314	1/с	+			
L_0	9.62E-04	Гн.	+			
C_0	1.15924E-08	Ф.	+			+
$\Delta P_{кор}$	150		+			
l	300	км	+			
r_0	0.051	Ом/км	+	+		
x_0	0.302	Ом/км	+	+		
g_0	0	См/км	+	+		
b_0	3.64	См*10 ⁻⁶ /км	+	+		
z_B	289.058-24.236i		+	+		
α_0	1.05E-03	эл. град/км	+			
n	3				+	+
R_0	0.4	см			+	
$E_{дон}$	25	кВ/см			+	
K_n	1.05	кВ			+	
U_{ϕ}	190.75	Вт.			+	+
q_i	2.19305	Ф				+
$\cos(\gamma_i - \alpha_i)$	1					+
v	300000	км/с				+
P_n			368.577+30.903i	374.1+31.3i	300.43125	379.20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных на конкретных примерах исследований позволяют сравнить полученные величины передаваемой мощности, рассчитанные различными методами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю.П. Рыжов. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для ВУЗ-ов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с
- [2] Г.Н. Александров. Пропускная способность воздушных линий электропередачи с расщепленными проводами. Сб. «Линии электропередачи повышенной пропускной способности». АН Молдовы, Кишинев, Штиинца, 1982. с. 24-33.
- [3] Постолатий В.М., Шакарян Ю. Г., Тимашова Л.В., Быкова Е.В. Технические возможности электропередач повышенной пропускной способности для объединения ОЭС Сибири и ОЭС Востока. Сборник трудов научно- практической конференции «Проблемы и пути решения эффективного использования топливно-энергетических ресурсов 22-23 декабря 2013г с.18-26.

- [4] Шакарян Ю. Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н., Постолатий В.М. Эффективность передачи электрической энергии при применении компактных управляемых ВЛ. Журнал «Энергия единой сети», июнь- июль 2014 , №3(14), с. 4-16.

СВЕДЕНИЯ О АВТОРАХ



Постолатий Виталий Михайлович, д.х.т.н, академик АНМ, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: управляемые, гибкие, компактные электропередачи,

современные средства регулирования, энергетическая безопасность. postolatii@rambler.ru



Голуб Ирина Владимировна, Институт Энергетики АНМ. Область научных интересов: режимы энергосистем, управляемые линии электропередачи переменного тока.

irina.golub@mail.ru