

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С КООКСИАЛЬНЫМИ ФАЗАМИ

Линии электропередачи, фазы которых выполняются коаксиальными, в общем случае представляют собой фактически двухцепные криогенные или газовые ЛЭП, но обладающие рядом специфических особенностей. В таких конструкциях линий важной величиной является напряжение между внутренним и внешним токопроводами, так как им определяется выбор толщины электроизоляции между проводниками коаксиала. Кроме того, на базе коаксиальных фаз криогенных и газовых ЛЭП могут быть созданы управляемые электропередачи за счет подачи различных по модулю и по фазе напряжений и токов на токопроводы коаксиала.

В связи с этим представляет интерес получить выражения общей мощности линии с коаксиальными фазами (мощности двух цепей), содержащие величину напряжения между проводниками коаксиала и фазы напряжений и токов обеих цепей.

Вычислим сначала модуль напряжения между проводниками коаксиала. Напряжение коаксиала

$$\dot{U}_k = \dot{U}_1 - \dot{U}_2, \quad (1)$$

где \dot{U}_1 , \dot{U}_2 - векторы фазных напряжений внутреннего и внешнего проводников. Графически эта разность изображена на рис.1.

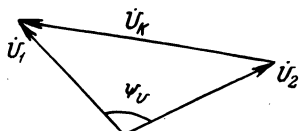


Рис. 1. Векторная диаграмма напряжений.

На основании треугольника напряжений, образованного векторами \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_k , по теореме косинусов получим:

$$\dot{U}_k = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \psi_u}, \quad (2)$$

где ψ_u - угол между векторами напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 коаксиала. Обозначим через

$$k_u = |\dot{U}_2/\dot{U}_1| = U_2/U_1, \quad (3)$$

тогда

$$U_k = U_1 \sqrt{1 + k_u^2 - 2k_u \cos \psi_u}. \quad (4)$$

Рассмотрим частные случаи работы линии по различным схемам:

1. Схема противотока. В этом случае при заземлении внешнего проводника коаксиала $U_2 = 0$ и

$$U_K = U_1 \quad (5)$$

2. Схема противофазы напряжений. Для нее имеем

$$|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2| = U; \quad |\psi_u| = 180^\circ.$$

На основании формулы (2) получим

$$U_K = 2U. \quad (6)$$

3. Схема спаренных фаз. В этой схеме при условии, что $|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2| = U$ и $|\psi_u| = 120^\circ$, из выражения (2) определяем

$$U_K = \sqrt{3} U. \quad (7)$$

Теперь найдем выражения комплекса полной мощности коаксиальной линии электропередачи. Рассмотрим общий случай,

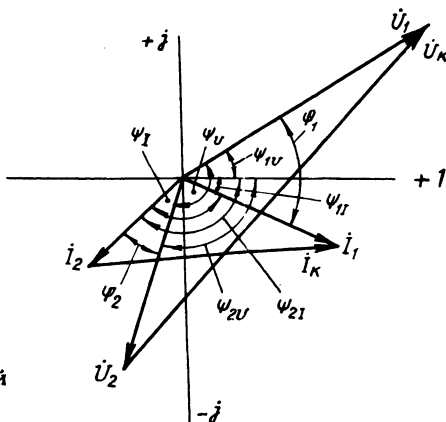


Рис. 2. Общий случай векторной диаграммы напряжений и токов.

когда напряжения и токи внутреннего и внешнего проводников коаксиала не равны по модулю и отличаются по фазе на произвольные углы (рис. 2).

Представим мощность коаксиальной линии как двухцепной в виде

$$\begin{aligned} \dot{S}_K = & 3\hat{U}_1 \dot{i}_1 + 3\hat{U}_2 \dot{i}_2 = 3U_1 I_1 e^{-j\psi_{1u}} e^{j\psi_{1I}} + \\ & + 3U_2 I_2 e^{-j\psi_{2u}} e^{j\psi_{2I}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где \dot{i}_1 , \dot{i}_2 – векторы токов внутреннего и внешнего проводников коаксиала; ψ – углы, характеризующие фазы соответствующих напряжений и токов.

Введем следующие обозначения:

$$k_I = \left| \dot{I}_2 / \dot{I}_1 \right| = I_2 / I_1; \quad (9)$$

$$\varphi_u = \varphi_{1u} - \varphi_{2u}; \quad \varphi_I = \varphi_{1I} - \varphi_{2I}; \quad (10)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{1u} - \varphi_{1I}; \quad \varphi_2 = \varphi_{2u} - \varphi_{2I}. \quad (11)$$

С учетом выражений (3), (9) и (11) для равенства (8) получим

$$\begin{aligned} \dot{S}_k &= 3 U_1 \dot{I}_1 (e^{-j\varphi_1} + k_u k_I e^{-j\varphi_2}) = 3 U_1 \dot{I}_1 e^{-j\varphi_1} \times \\ &\times (1 + k_u k_I e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)}) \end{aligned} \quad (12)$$

или

$$\begin{aligned} \dot{S}_k &= S_1 e^{-j\varphi_1} (1 + k_u k_I e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)}) = \\ &= \dot{S}_1 (1 + k_u k_I e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)}). \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда с учетом (10) и (11) из (13) найдем

$$\begin{aligned} \dot{S}_k &= \dot{S}_1 (1 + k_u k_I e^{-j(\varphi_u - \varphi_I)}) = 3 \hat{U}_1 \dot{I}_1 \times \\ &\times (1 + k_u k_I e^{-j(\varphi_u - \varphi_I)}). \end{aligned} \quad (14)$$

Введем в формулу мощности напряжение коаксиала. Для этого запишем

$$\begin{aligned} \hat{U}_k &= \hat{U}_1 - \hat{U}_2 = \hat{U}_1 \left(1 - \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1}\right) = \hat{U}_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1} e^{j(\varphi_{1u} - \varphi_{2u})}\right) = \\ &= \hat{U}_1 (1 - k_u e^{j\varphi_u}). \end{aligned}$$

$$\text{Отсюда } \hat{U}_1 = \hat{U}_k / (1 - k_u e^{j\varphi_u}). \quad (15)$$

Подставим значение \hat{U}_1 из (15) в формулу (14)

$$\dot{S}_k = 3 \hat{U}_k \dot{I}_1 \frac{1 + k_u k_I e^{-j(\varphi_u - \varphi_I)}}{1 - k_u e^{j\varphi_u}} = 3 U_k I_1 e^{-j\varphi_k} \times$$

$$\times \frac{1+k_u k_I e^{-j(\psi_u - \psi_I)}}{1 - k_u e^{j\psi_u}}, \quad (16)$$

где ψ_k - угол между векторами напряжения коаксиала и током внутреннего проводника.

Угол ψ_k не всегда известен, поэтому получим формулы, не содержащие его.

Выражая из (4) величину U_1 и подставляя в (12), получим

$$\dot{S}_k = 3U_k I_1 e^{-j\psi_1} \frac{(1+k_u k_I e^{-j(\psi_u - \psi_I)})}{\sqrt{1+k_u^2 - 2k_u \cos \psi_u}}. \quad (17)$$

Введем понятие несбалансированного тока коаксиала и как для (1) запишем

$$\dot{I}_k = \dot{I}_1 - \dot{I}_2.$$

Оно может быть полезным при оценке результирующего влияния токов проводников коаксиала на экран.

Модуль тока \dot{I}_k по теореме косинусов по аналогии с формулами (2) и (4) k может быть представлен в виде

$$I_k = I_1 \sqrt{1+k_I^2 - 2k_I \cos \psi_I}. \quad (18)$$

Таким образом, выразив I_1 из (18) и подставив его в (17), получим выражение комплекса полной мощности линии электропередачи с коаксиальными фазами

$$\dot{S}_k = 3U_k \dot{I}_k e^{-j\psi_1} \frac{1+k_u k_I e^{-j(\psi_u - \psi_I)}}{\sqrt{(1+k_u^2 - 2k_u \cos \psi_u)(1+k_I^2 - 2k_I \cos \psi_I)}}. \quad (19)$$

В заключение рассмотрим наиболее характерные частные случаи применения различных схем линий и проведем их сравнение на основании числовых примеров расчета.

1. Схема противотока. Внешний проводник коаксиала заземлен, $U_2 = 0$. При условии, что $I_1 = I_2 = I$; $\psi_1 = \psi_2 = \psi$, тогда на основании (3) и (9) $k_u = 0$, $k_I = 1$.

Из формулы (17) получим

$$\dot{S}_k = 3U_k I e^{-j\varphi}, \quad (20)$$

где U_k определяется по выражению (5).

2. Схема противофазы напряжений: $|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2|; |\dot{i}_1| =$

$$|\dot{i}_2| = I; \varphi_{2u} = \varphi_{1u} - 180^\circ; \varphi_{2I} = \varphi_{1I} - 180^\circ; \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi.$$

Тогда $k_u = 1; k_I = 1; \varphi_u = 180^\circ; \varphi_I = 180^\circ$. Подставляя эти значения в формулу (17), получим

$$\dot{S}_k = 3U_k I e^{-j\varphi}, \quad (21)$$

где U_k определяется по выражению (6).

3. Схема спаренных фаз: $|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2|; |\dot{i}_1| = |\dot{i}_2| = I;$

$$\varphi_{2u} = \varphi_{1u} - 120^\circ; \varphi_{2I} = \varphi_{1I} - 120^\circ; \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi.$$

При этих условиях $k_u = 1; k_I = 1; \varphi_u = 120^\circ; \varphi_I = 120^\circ$.

Подставив эти значения в (17) и выполнив соответствующие преобразования, получим

$$\dot{S}_k = 2\sqrt{3} U_k I e^{-j\varphi},$$

где U_k определяется по выражению (7).

4. Схема противофазы напряжений при условии $\varphi_{2u} = \varphi_{1u} - 180^\circ; \varphi_{2I} = \varphi_{1I} - 180^\circ; \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, но $|\dot{U}_1| \neq |\dot{U}_2|$ и $|\dot{i}_1| \neq |\dot{i}_2|$.

При $k_u \neq 1$ и $k_I \neq 1$ из формулы (17) получим

$$\dot{S}_k = 3U_k I_1 \frac{1 + k_u k_I}{1 + k_u} e^{-j\varphi}. \quad (23)$$

При $k_u = 1$

$$\dot{S}_k = 3U_k I_1 \frac{1 + k_I}{2} e^{-j\varphi} = 3U_1 I_1 (1 + k_I) e^{j\varphi}, \quad (24)$$

при варьировании напряжения и тока в широких пределах

Таблица 1. Числовые значения комплекса полной мощности

Вариант схемы	Номинальное напряжение внутреннего проводника коаксиала U_1 , кВ	Величина комплекса полной		
		$k_u = 1^*$, $k_I = 1$		
		1	10	50
Противотока	0,4	0,001	0,012	0,06
	35	0,105	1,05	5,25
	110	0,33	3,3	16,5
Противофазы	0,4	0,002	0,024	0,12
	35	0,21	2,1	10,5
	110	0,66	6,6	33,0
Спаренных фаз	0,4	0,002	0,024	0,12
	35	0,21	2,1	10,5
	110	0,66	6,6	33,0

мощности \dot{S}_k , ГВ·А при условиях и номинальных токах, кА								
$k_u = 1, I_1 < I_2,$ $k_u = 1,05,$ $I_1 > I_2, k_I = 0,95$			$k_I = 1,$ $U_1 > U_2,$ $k_U = 0,95$			$U_1 > U_2, k_u = 0,95$ $I_1 < I_2, k_I = 1,05$		
1	10	50	1	10	50	1	10	50
—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,002	0,023	0,12	0,002	0,024	0,12	0,002	0,02	0,12
0,2	2,05	10,3	0,21	2,1	10,5	0,21	2,1	10,7
0,64	6,4	32,2	0,66	6,6	33,0	0,67	6,7	33
0,002	0,023	0,12	0,002	0,024	0,12	0,002	0,02	0,12
0,2	2,05	10,3	0,21	2,1	10,5	0,21	2,1	10,7
0,64	6,4	32,2	0,66	6,6	33,0	0,67	6,7	33,0

* Кроме схемы противотока, для которой $U_2 = 0, k_u = 0$.

5. Схема спаренных фаз при условии $\psi_{2u} = \psi_{1u} - 120^\circ$; $\psi_{2I} = \psi_{1I} - 120^\circ$; $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, но $|\dot{U}_1| \neq |\dot{U}_2|$ и $|\dot{i}_1| \neq |\dot{i}_2|$. После соответствующих преобразований при $k_u \neq 1$ и $k_I \neq 1$ из формулы (17) получим

$$\dot{S}_k = 3U_k I_1 \frac{1+k_u k_I}{\sqrt{k_u^2 + k_u + 1}} e^{-j\varphi} \quad (25)$$

При $k_u = 1$

$$\dot{S}_k = \sqrt{3} U_k I_1 (1+k_I) e^{-j\varphi} \quad (26)$$

В качестве примера рассмотрим коаксиальную сверхпроводящую кабельную линию переменного тока с изменяющимся напряжением от 0,4 до 110 кВ и током от 1 до 50 кА. Для выбранных величин определим числовые значения комплекса полной мощности. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Анализ полученных зависимостей (20)–(26) при значениях $k_u = 1$; $k_u \neq 1$ и $k_I = 1$; $k_I \neq 1$ (табл. 1), разных углах φ и ψ показывает, что мощность линий электропередачи с коаксиальными фазами при вариантах схем противофазы и спаренных фаз не изменяется, а по отношению к схеме противотока – увеличивается в два раза.

УДК 621.316.1:658.26

Б.М. Валов, В.В. Прокопчик

ПОГРЕШНОСТИ АППАРАТУРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Для контроля и анализа показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в настоящее время широко используется плотность распределения (ПР). Это обусловлено тем, что ПКЭ являются случайными процессами, которые наиболее полно описываются указанной вероятностной характеристикой. Применение ПР уже реализовано в известном приборе САКН (статистический анализатор качества напряжения) и рекомендуется для использования в других приборах контроля ПКЭ. Вместе с тем при аппаратурном определении ПР имеют место случайные погрешности, которые необходимо учитывать для получения достоверной информации.