

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ВОЛНОВОЙ ДЛИНЫ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ЛИНИЙ

О. Б. ТОЛПЫГО

(Представлено научным семинаром энергетического факультета)

Проектирование и строительство крупнейших в мире электропередач Куйбышев—Москва и Сталинград—Москва потребовало от советских ученых и инженеров разработки целого ряда проблем, определяющих передачу больших мощностей переменным током на дальние расстояния.

Основной проблемой длинных электропередач является устойчивость параллельной работы электрических станций, разделенных длинной линией. Одним из главных мероприятий, позволяющих повысить устойчивость, служит компенсация индуктивности и емкости линии.

Компенсированная линия обладает совершенно новыми свойствами, отличающими ее от некомпенсированной линии. Важными характеристиками компенсированной линии являются волновое сопротивление и волновая длина, определению которых посвящена данная работа.

Компенсированная линия электропередачи представляет собой устройство, сочетающее распределенные сопротивления и проводимости (линия) и сосредоточенные (компенсирующие устройства). Свойства такой линии будут определяться совокупностью всех элементов, входящих в нее.

В литературе нет единого установившегося определения волнового сопротивления и волновой длины компенсированных линий без потерь.

Как известно [1], волновое сопротивление линии находится из выражения $Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$,

где L_0 —индуктивность и C_0 —емкость единицы длины линии.

Ряд авторов [2; 3] на основании этой формулы предлагает определять волновое сопротивление компенсированной линии по формулам

$$Z_{ee} = \sqrt{\frac{L - L_k}{L}}, \quad \text{если компенсируется индуктивность линии,}$$

$$Z_{ee} = \sqrt{\frac{L}{C - C_k}}, \quad \text{если компенсируется емкость линии,}$$

$$Z_{ee} = \sqrt{\frac{L - L_k}{C - C_k}}, \quad \text{если применяются оба вида компенсации—продольная и поперечная.}$$

Соответственно волновая длина компенсированной линии определяется по формуле

$$\lambda_e = \sqrt{LC} \sqrt{\left(1 - \frac{L_k}{L}\right) \left(1 - \frac{C_k}{C}\right)},$$

где L_k и C_k —соответственно компенсируемые индуктивность и емкость.

Такая методика (условно назовем ее „методика № 1“) не учитывает места положения КУ на линии и вообще может быть применима при равномерном размещении компенсирующих устройств вдоль линии через небольшие расстояния.

Вульф [1] совершенно справедливо предложил определять волновое сопротивление и волновую длину компенсированной линии на базе коэффициентов электрического расчета линии, так как всякая компенсированная линия может быть представлена в виде многозвенного четырехполюсника, напряжения и токи которого связаны уравнением

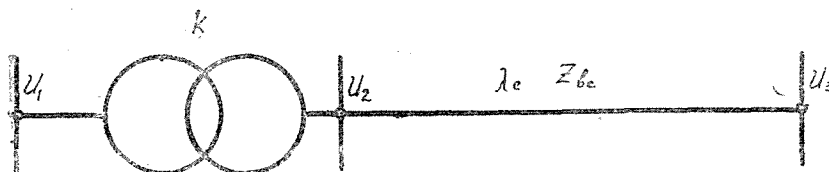
$$U_1 = A_e U_2 + B_e I_2,$$

$$I_1 = C_e U_2 + D_e I_2.$$

Волновое сопротивление компенсированной линии, согласно методике Вульфа (условно назовем ее „методикой № 2“), определяется выражением

$$Z_{\text{ве}} = -\frac{1}{k} \sqrt{\frac{B_e}{C_e}},$$

где $k = \sqrt{\frac{A_e}{D_e}}$ — коэффициент, учитывающий несимметрию схемы компенсированной линии, которая заменяется так называемой универсальной схемой (фиг. 1).



Фиг. 1. Универсальная схема замещения линии электропередачи.

Нам кажется, что замена действительной схемы линии такой универсальной схемой является отступлением от действительности, так как несимметрия распространяется на самом деле на всю линию, и линия не состоит, как показано в универсальной схеме, из одного несимметричного участка (трансформатор) и симметричного участка (линия), коэффициенты A и D которой равны. Такое отступление от действительности, как будет показано ниже, в случае несимметричного расположения компенсирующих устройств ведет к неточному определению волнового сопротивления и волновой длины линии.

На наш взгляд, волновое сопротивление и волновую длину компенсированной линии необходимо определять иным путем, излагаемым ниже.

Известно [4], что всякий четырехполюсник, а компенсированная линия есть четырехполюсник, характеризуется так называемым повторным сопротивлением, которое в натуральном режиме работы линии равно ее волновому (характеристическому) сопротивлению.

Для линии мы можем написать

$$\dot{U}_1 = A_e \dot{U}_2 + B_e \dot{I}_2,$$

$$\dot{I}_1 = C_e \dot{U}_2 + D_e \dot{I}_2.$$

В режиме натуральной мощности, который возможен в том случае, если сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению компенсированной линии

$$Z_2 = Z_{\text{ве}}$$

$$\text{ток нагрузки } \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_{\text{ве}}},$$

будет справедливо

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A_e U_2 + B_e \frac{U_2}{Z_{se}} = U_2 \left(A_e + \frac{B_e}{Z_{se}} \right), \\ I_1 &= C_e U_2 + D_e \frac{U_2}{Z_{se}} = U_2 \left(C_e + \frac{D_e}{Z_{se}} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Но согласно определению волнового сопротивления как повторного сопротивления, четырехполюсник

$$Z_{se} = \frac{\dot{U}_1}{I_1} \quad (3)$$

и, исходя из (2),

$$Z_{se} = \frac{A_e + \frac{B_e}{Z_{se}}}{C_e + \frac{D_e}{Z_{se}}} \quad (4)$$

или

$$Z_{se} = \frac{A_e Z_{se} + B_e}{C_e Z_{se} + D_e}, \quad (5)$$

откуда

$$Z_{se}^2 C_e + Z_{se} (D_e - A_e) - B_e = 0 \quad (6)$$

и окончательно

$$Z_{se} = \frac{-(D_e - A_e) \pm \sqrt{(D_e - A_e)^2 + 4B_e C_e}}{2C_e}. \quad (7)$$

После преобразований получим

$$Z_{se} = \frac{-(D_e - A_e) + \sqrt{(D_e + A_e)^2 - 4}}{2C_e}, \quad (8)$$

(решение $Z_{se} = \frac{-(D_e - A_e) - \sqrt{(D_e + A_e)^2 - 4}}{2C_e}$ не имеет физического смысла).

В случае компенсированной линии с симметричным расположением КУ относительно концов линии $A = D$, а потому для такой линии

$$Z_{se} = \sqrt{\frac{A_e^2 - 1}{C_e}}. \quad (9)$$

Для некомпенсированной линии должно быть справедливо равенство

$$Z_{se} = Z_a.$$

На самом деле,

$$Z_{se} = \sqrt{\frac{B}{C}} = \sqrt{\frac{jZ_0 \sin \lambda}{j \frac{\sin \lambda}{Z_0}}} = Z_0.$$

Из выражения (2) следует, что

$$\dot{U}_1 = U_2 \left(A_e + \frac{B_e}{Z_{se}} \right) = U_2 e^{j\lambda_e},$$

а потому

$$\lambda_e = \ln \left(A_e + \frac{B_e}{Z_{se}} \right),$$

откуда определяется волновая длина компенсированной линии.

Расчеты режимов компенсированных линий с волновым сопротивлением, определяемым нашим методом, проведенные в данной работе для большого числа схем, дают полное совпадение модулей векторов напряжений и токов начала и конца линии, что также подтверждено опытом на экспериментальной установке—модели длинной компенсированной линии.

Ниже приводится таблица волновых сопротивлений и волновых длин для некоторых схем компенсированных линий, которые определены всеми тремя методами.

Таблица № 1

N р/л	Вид схемы линии	Волновые сопротивления			Волновая длина		
		1-ый метод	2-ой метод	3-ий метод	1-ый метод	2-ой метод	3-ий метод
1		0,705	0,74	0,74	42°15'	46°30'	46°30'
2		0,705	1,32	0,88/-14°30'	42°15'	48°50'	46°20'
3		0,705	0,65	0,88/14°30'	42°15'	48°50'	46°20'
4		0,705	0,745	0,745	42°15'	45°30'	45°30'
5		1,41	0,88	1,16/14°50'	42°15'	52°	47°
6		1,41	1,34	1,34	42°15'	46°30'	46°30'
7		1	0,78	0,9/11°10'	30°	39°20'	42°50'
8		1,41	1,56	1,16/-14°30'	42°15'	52°	47°

Как видно из таблицы, величины волновых сопротивлений, полученных по методике № 2 и методике № 3, предложенной нами, существенно отличаются для всех несимметричных схем. Волновые сопротивления одинаковыми получаются только для симметричных схем.

С увеличением несимметрии схем разница значительно увеличивается. Особенно велика разница в величинах волновых сопротивлений для схем с концевым расположением компенсирующих устройств.

Величина волнового сопротивления получается комплексной, состоящей из активной составляющей и реактивной составляющей, знак которой зависит от места расположения КУ на линии и вида КУ. При этом при расположении КУ в схемах с одиночной компенсацией до или после середины линии меняется знак реактивной составляющей.

На основании наших расчетов, подтвержденных опытом на модели длинной линии, можно сделать следующие выводы.

1. Определение волнового сопротивления и волновой длины компенсированной линии, согласно описанным в литературе методикам, неточно и не учитывает особенностей сочетания распределенных и сосредоточенных постоянных линий.

2. Метод, предложенный Вульфом, учитывает специфику сочетания распределенных и сосредоточенных параметров, но дает правильные значения волнового сопротивления и волновой длины только для случая симметричного расположения КУ относительно концов линии. Учет несимметрии путем введения вспомогательного параметра $k = \sqrt{\frac{A}{D}}$ дает результаты, не подтверждаемые опытом и неправильные в принципе.

3. Методика определения $Z_{ве}$ как повторного сопротивления четырехполюсника, предложенная автором, отражает все особенности компенсированных линий и дает результаты, подтвержденные опытом.

4. Величина волнового сопротивления компенсированных линий в общем случае—величина комплексная, реактивная составляющая которой и по величине, и по знаку зависит от вида компенсирующего устройства и места расположения его на линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вульф А. А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям. Госэнергоиздат, 1941.
2. Залесский А. М. Передача электрической энергии. Госэнергоиздат, 1948.
3. Рюденберг Р. Электрическая передача больших мощностей на далекие расстояния. Энергоиздат, 1934.
4. Калантаров П. Л. и Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1951.