

РАСЧЕТ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Павел Олегович Гуков
Дмитрий Николаевич Афоничев
Сергей Николаевич Пиляев

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Расчет режима линий электропередачи является важной задачей при анализе и при эксплуатации электрических сетей. Расчет установившегося режима сводится к определению напряжений и мощностей в узлах схем замещения. Конфигурации электрических сетей могут быть различными в зависимости от назначения сети (распределительная, питающая, системообразующая) и класса напряжения. Простейшие замкнутые сети можно рассматривать как линии с двухсторонним питанием. В линиях электропередачи сельских распределительных сетей 10 и 35 кВ изначально также предусматриваются два источника питания. При эксплуатации такие линии размыкаются, как правило, в точке потокораздела мощностей. Для расчета режима линий с двухсторонним питанием используют известный метод моментов мощностей. На первом этапе без учета потерь определяется точка потокораздела мощности – узел, в который мощность поступает с разных сторон от двух источников. Исходная линия разделяется в этом узле на две части, расчет которых проводится с учетом потерь, как для линий с односторонним питанием. Нами предлагается метод определения точки потокораздела мощностей, основанный на определении потоков мощности поочередно для каждого нагрузочного узла. В соответствии с принципом наложения полученные потоки затем суммируются на каждом участке. В результате получаем распределение потоков мощности в линии. Предложенный метод позволяет определить точку потокораздела с меньшим объемом расчетов по сравнению с методом моментов мощностей. В частности, нет необходимости определять уравнивающую мощность при различных напряжениях на концах линии и считать напряжения в нагрузочных узлах одинаковыми, что является начальным допущением в методе моментов мощностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: линия электропередачи с двухсторонним питанием, точка потокораздела мощностей, принцип наложения.

DESIGN CALCULATION OF A POWER TRANSMISSION LINE WITH TWO-WAY POWER SUPPLY

Pavel O. Gukov
Dmitriy N. Afonichev
Sergey N. Pilyaev

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Design calculation of the mode of transmission lines is an important task in the analysis and operation of electric networks. The calculation of a steady-state mode is reduced to the determination of voltages and powers in equivalent circuit nodes. The system configurations can be different depending on the purpose of the network (distributing, supply, or backbone) and voltage class. The simplest loop networks can be considered as lines with two-way power supply. In the transmission lines of rural distribution networks of 10 kV and 35 kV two power supplies are also initially provided. In the process of operation such lines are opened, as a rule, in the power partition node. In order to calculate the mode of lines with two-way power supply the known method of power moments is used. At the first stage, without taking losses into account, the node of power partition is determined, which is a node to which power is supplied from different sides from two sources. In this node the source line is divided into two parts that are calculated taking into account the losses, like for one-way supply lines. The authors have proposed a method for determining the power partition node based on the determination of power flows for each load bus by turns. According to the principle of superposition, the resulting flows are then summed up at each circuit section. As a result, the distribution of power flows in the line can be obtained. The proposed method allows determining the power partition node with a smaller volume of calculations compared to the method of power moments. In particular, it is not necessary to determine the equalizing power at different voltages at the line ends and to consider the stresses at the load buses to be equal, which is the initial assumption in the method of power moments.

KEY WORDS: power transmission line with two-way power supply, power partition node, principle of superposition.

Введение

Линии электропередачи сельских электрических сетей напряжением 10 и 35 кВ обычно работают в разомкнутом режиме с односторонним питанием [2, 10]. Для разделения линии на части в ней устанавливается разъединитель или секционирующий пункт [9]. Расчет режимов таких сетей можно проводить различными методиками, учитывающими одностороннее питание [7]. При выборе места размыкания линия первоначально рассматривается как цепь с двумя источниками. Критерием выбора, как правило, является минимум потерь [6]. В большинстве случаев точку размыкания линии выбирают в точке потокораздела мощностей. Сети напряжением 110 кВ являются замкнутыми [4]. В простейших случаях их можно рассматривать как линии с двухсторонним питанием и несколькими точками отбора мощности [3]. Расчет режима таких линий можно проводить через определение потоков мощности на участках, например, методом моментов мощностей [8]. Таким образом, расчет потокораспределения и определение точки потокораздела представляют собой актуальную задачу и при выборе места размыкания, и при расчете режима линий электропередачи.

На рисунке 1 представлена расчетная схема линии с двухсторонним питанием. Показаны узлы (1-й и n-й – питающие, со 2-го по n-1 – нагрузочные), мощность в нагрузочных узлах с \underline{S}_2 по \underline{S}_{n-1} , направления потоков мощности на участках с \underline{S}_{12} по $\underline{S}_{n,n-1}$ и сопротивления участков с Z_{12} по $Z_{n-1,n}$.

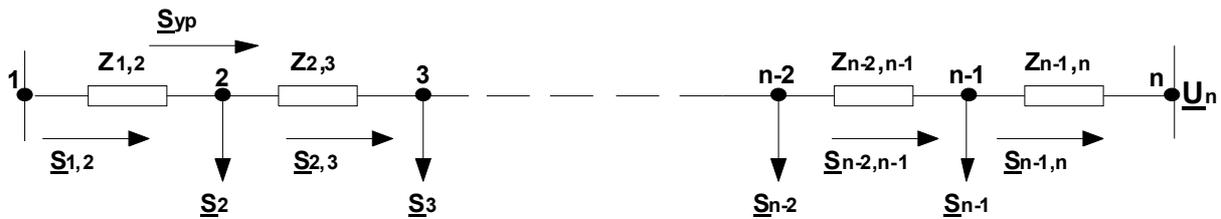


Рис. 1. Расчетная схема линии с двухсторонним питанием

В соответствии с методом моментов мощностей при одинаковых напряжениях источников ($U_1 = U_n$) мощность участка \underline{S}_{12} рассчитывается по формуле

$$\underline{S}_{12} = \frac{\sum_{i=2}^{n-1} \underline{S}_i^* Z_{1i}}{Z_{1n}} \quad (1)$$

Здесь принято, что все мощности на участках направлены от узла 1 к узлу n. Сопротивление Z_{1i}^* – сумма комплекс-сопряженных значений сопротивлений от узла 1 до i-го узла, Z_{1n}^* – сумма комплекс-сопряженных значений всех сопротивлений линии.

Если напряжения по концам различны, то в линии возникают сквозной уравнительный ток I_{yp} и уравнительная мощность S_{yp} :

$$\underline{I}_{yp} = \frac{U_1 - U_n}{\sqrt{3} Z_{1n}}, \quad \underline{S}_{yp} = \sqrt{3} I_{yp}^* U_{ном} = \frac{U_1 - U_n}{Z_{1n}} U_{ном} \quad (2)$$

Мощность участка \underline{S}_{12} с учетом уравнительной мощности рассчитывается по формуле

$$\underline{S}_{12} = \frac{\sum_{i=2}^{n-1} \underline{S}_i^* Z_{1i}}{Z_{1n}} + \underline{S}_{yp} \quad (3)$$

Зная мощность головного участка, можно рассчитать мощности на других участках:

$$\underline{S}_{23} = \underline{S}_{12} - \underline{S}_2, \underline{S}_{34} = \underline{S}_{23} - \underline{S}_3, \dots, \underline{S}_{n-1n} = \underline{S}_{n-2n-1} - \underline{S}_{n-1} . \quad (4)$$

Узел, после которого мощность на участке меняет знак, является точкой потоко-раздела.

Методика расчета

Рассмотрим простейший случай линии с двухсторонним питанием и одним нагрузочным узлом (рис. 2).

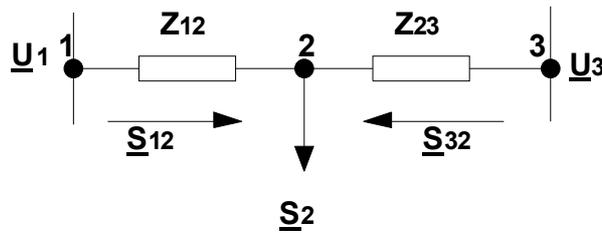


Рис. 2. Расчетная схема линии с одним нагрузочным узлом

Падение напряжения на участке линии электропередачи определяется по известной формуле [8]

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3} \underline{I} \underline{Z} = \frac{\underline{S}^*}{U} \cdot \underline{Z} = \frac{Pr + Qx}{U} + j \frac{Px - Qr}{U} , \quad (5)$$

где P, Q – активная и реактивная мощности, передаваемые по участку;
 r, x – активное и реактивное сопротивления участка.

Для рассматриваемой линии напряжение узла 2 можно рассчитать как по напряжению U_1 , так и по напряжению U_3 :

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U}_{12}; \quad \underline{U}_2 = \underline{U}_3 - \Delta \underline{U}_{32} \Rightarrow \underline{U}_1 - \Delta \underline{U}_{12} = \underline{U}_3 - \Delta \underline{U}_{32} . \quad (6)$$

На этом этапе потери мощности в линии не учитываются. Также полагаем напряжения U_1, U_3 действительными числами.

Для действительной части равенства $U_1 - \Delta U_{12} = U_3 - \Delta U_{32}$

$$U_1 - \frac{P_{12}r_{12} + Q_{12}x_{12}}{U_1} = U_3 - \frac{P_{32}r_{32} + Q_{32}x_{23}}{U_3} . \quad (7)$$

Для мнимой части

$$U_1 - \frac{P_{12}x_{12} - Q_{12}r_{12}}{U_1} = U_3 - \frac{P_{32}x_{32} - Q_{32}r_{23}}{U_3} . \quad (8)$$

Без учета потерь мощности $\underline{S}_2 = \underline{S}_{12} + \underline{S}_{32}$ или $P_2 = P_{12} + P_{32}, Q_2 = Q_{12} + Q_{32}$. (9)

Преобразуем действительную часть

$$1 - P_{12} \frac{r_{12}}{U_1} - Q_{12} \frac{x_{12}}{U_1} = 1 - P_{32} \frac{r_{23}}{U_3} - Q_{32} \frac{x_{23}}{U_3} . \quad (10)$$

Введем коэффициенты:

$$a_{12} = \frac{r_{12}}{U_1}, b_{12} = \frac{x_{12}}{U_1}, a_{23} = \frac{r_{23}}{U_3}, b_{23} = \frac{x_{23}}{U_3} . \quad (11)$$

Окончательно для действительной части получаем

$$-a_{12}P_{12} - b_{12}Q_{12} + a_{23}P_{32} + b_{23}Q_{32} = 0. \quad (12)$$

Аналогично преобразуем мнимую часть. В результате получаем систему из четырех линейных уравнений с неизвестными $P_{12}, Q_{12}, P_{32}, Q_{32}$:

$$\begin{aligned} -a_{12}P_{12} - b_{12}Q_{12} + a_{23}P_{32} + b_{23}Q_{32} &= 0; \\ -b_{12}P_{12} + a_{12}Q_{12} + b_{23}P_{32} - a_{23}Q_{32} &= 0; \\ P_{12} + P_{32} &= P_2; \\ Q_{12} + Q_{32} &= Q_2. \end{aligned} \quad (13)$$

Для произвольного узла с номером k схемы, показанной на рисунке 1, система принимает вид:

$$\begin{aligned} -a_{1k}P_{1k} - b_{1k}Q_{1k} + a_{kn}P_{nk} + b_{kn}Q_{nk} &= 0; \\ -b_{1k}P_{1k} + a_{1k}Q_{1k} + b_{kn}P_{nk} - a_{kn}Q_{nk} &= 0; \\ P_{1k} + P_{nk} &= P_k; \\ Q_{1k} + Q_{nk} &= Q_k. \end{aligned} \quad (14)$$

Коэффициенты в уравнениях (14) рассчитываются по формулам:

$$a_{1k} = \frac{r_{1k}}{U_1}, b_{1k} = \frac{x_{1k}}{U_1}, a_{kn} = \frac{r_{kn}}{U_n}, b_{kn} = \frac{x_{kn}}{U_n}, \quad (15)$$

$$r_{1k} = \sum_{m=1}^{k-1} r_{m m+1}, x_{1k} = \sum_{m=1}^{k-1} x_{m m+1}, \quad (16)$$

$$r_{kn} = \sum_{m=k}^{n-1} r_{m m+1}, x_{kn} = \sum_{m=k}^{n-1} x_{m m+1}. \quad (17)$$

С помощью последней системы для каждого нагрузочного узла рассчитываются мощности, поступающие от питающих узлов. Получаем набор частичных потоков мощности для всех участков линии (рис. 3).

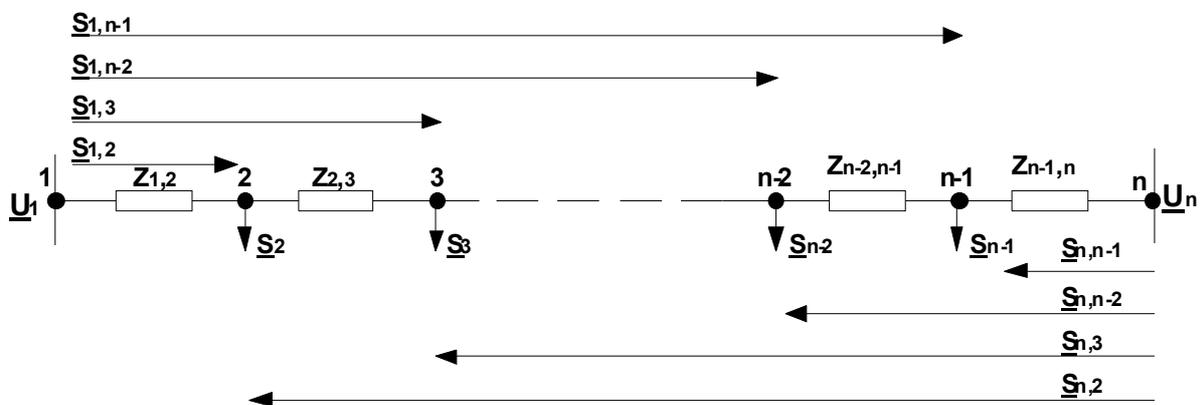


Рис. 3. Распределение частичных потоков мощности

В соответствии с принципом наложения суммируем потоки на отдельных участках и определяем результирующее распределение мощности в линии [1]. Положительным считается направление от узла 1 к узлу n. Например:

$$P_{2,3} = P_{1,3} + P_{1,4} + \dots + P_{1,n-1} - P_{n,2}; \quad Q_{2,3} = Q_{1,3} + Q_{1,4} + \dots + Q_{1,n-1} - Q_{n,2};$$

$$P_{n-2,n-1} = P_{1,n-1} - P_{n,n-2} \dots - P_{n,3} - P_{n,2}; \quad Q_{n-2,n-1} = Q_{1,n-1} - Q_{n,n-2} \dots - Q_{n,3} - Q_{n,2}.$$

Точка потокоораздела определяется так же, как в методе моментов мощностей.

Результаты

Определим по предложенной методике точку потокоораздела в линии 110 кВ с четырьмя нагрузочными узлами.

Линия выполнена проводом АС-120 с погонными сопротивлениями $r_0 = 0,249 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,427 \text{ Ом/км}$ [5].

Длины участков: $\ell_{12} = 15,6 \text{ км}$, $\ell_{23} = 10,5 \text{ км}$, $\ell_{34} = 5,6 \text{ км}$, $\ell_{45} = 20,2 \text{ км}$, $\ell_{56} = 7,8 \text{ км}$.

Действующие значения напряжений в питающих узлах: $U_1 = 115 \text{ кВ}$, $U_6 = 113 \text{ кВ}$.

Мощность в нагрузочных узлах:

$$\underline{S}_2 = 15 + j11 \text{ МВА}, \quad \underline{S}_3 = 25 + j18 \text{ МВА}, \quad \underline{S}_4 = 12 + j9 \text{ МВА}, \quad \underline{S}_5 = 35 + j28 \text{ МВА}.$$

Результаты расчетов потоков мощности

Частичные потоки мощности от питающего узла 1, МВА				
$\underline{S}_{1-2} = 11,13 + j8,16$	$\underline{S}_{1-3} = 14,18 + j10,21$	$\underline{S}_{1-4} = 5,68 + j4,26$	$\underline{S}_{1-5} = 4,64 + j3,71$	
Частичные потоки мощности от питающего узла 6, МВА				
$\underline{S}_{6-2} = 3,87 + j2,84$	$\underline{S}_{6-3} = 10,82 + j7,79$	$\underline{S}_{6-4} = 6,32 + j4,74$	$\underline{S}_{6-5} = 30,36 + j24,29$	
Результирующие потоки на участках, МВА				
$\underline{S}_{12} = 35,63 + j26,35$	$\underline{S}_{23} = 20,63 + j15,35$	$\underline{S}_{34} = -4,37 - j2,66$	$\underline{S}_{45} = -16,37 - j11,66$	$\underline{S}_{56} = -51,37 - j39,66$

Узел 3 является точкой потокоораздела для активной и реактивной мощности, так как на участке 3-4 обе составляющие меняют знак. Правильность расчета можно проверить, составив баланс мощности. Суммарная мощность, потребляемая в нагрузочных узлах, $\underline{S}_{\text{потр}} = \underline{S}_2 + \underline{S}_3 + \underline{S}_4 + \underline{S}_5 = 87 + j66 \text{ МВА}$. Мощность, поступающая в линию от источников, $\underline{S}_{\text{ист}} = \underline{S}_{12} + \underline{S}_{65} = 87 + j66,01 \text{ МВА}$.

Выводы

Предложен метод расчета линии электропередачи с двухсторонним питанием, основанный на определении потоков мощности поочередно для каждого нагрузочного узла с последующим суммированием мощности на участках линии. Правомерность использования принципа наложения в данном случае определяется линейным характером уравнений в системе (14).

В предложенном методе нет необходимости отдельно рассчитывать уравнительную мощность при различных напряжениях в питающих узлах, так как эта разница учитывается при расчете потокооразделений для каждого узла.

Кроме того, в предложенном методе напряжения в нагрузочных узлах рассчитываются с учетом падений напряжения, а не принимаются равными, как в методе моментов мощностей.

Все вышеуказанное позволяет сделать вывод, что предложенный метод расчета линий с двухсторонним питанием сокращает объем и повышает точность расчетов по сравнению с известными методиками.

Библиографический список

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – Москва : Высшая школа, 1996. – 638 с.
2. Будзко И.А. Электроснабжение сельского хозяйства : учебник для вузов / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская. – Москва : Колос, 2000. – 536 с.
3. Веников А.В. Электрические системы. Электрические сети : учебник для вузов / В.А. Веникова, В.А. Строев. – Москва : Высшая школа, 1998. – 256 с.
4. Герасименко А.А. Передача и распределение электроэнергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 715 с.
5. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4-750 кВ / Е.Г. Гологорский, А.Н. Кравцов, Б.М. Узелков ; под ред. Е.Г. Гологорского. – Москва : ЭНАС, 2007. – 560 с.
6. Гуков П.О. Анализ влияния распределения нагрузки в воздушных линиях 10 кВ на величину потерь мощности / П.О. Гуков // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – Вып. 1 (48). – С. 93-97.
7. Картавец В.В. Метод расчета режима распределительной электрической сети / В.В. Картавец, П.О. Гуков, Ю.М. Помогаев // Научное обозрение. – 2016. – № 10. – С. 98-104.
8. Лыкин А.И. Электрические системы и сети : учеб. пособие / А.И. Лыкин. – Москва : Логос, 2008. – 256 с.
9. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0.4-35 кВ и 110-1150 кВ ; под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – Москва : Папирус Про, 2005. – 640 с.
10. Наумов И.В. Электроснабжение сельского хозяйства : учебник / И.В. Наумов, Т.Б. Лещинская. – Москва : Колос, 2008. – 656 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Павел Олегович Гуков – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: guckow.pav@yandex.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 224-39-39, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Сергей Николаевич Пилаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: pilyaevs@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 18.08.2017

Дата принятия к печати 11.09.2017

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Pavel O. Gukov – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 224-39-39, E-mail: guckow.pav @yandex.ru.

Dmitriy N. Afonichev – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39, E-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Sergey N. Pilyaev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39, E-mail: pilyaevs@mail.ru.

Date of receipt 18.08.2017

Date of admittance 11.09.2017