

About some features of the power transfer mode on the long transmission line

Berzan V.P., Rimschi V.X., Tirsu M.S., Patsyuk V.I., Uzun M.N.

Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

E-mail: berzan@ie.asm.md

Abstract. The features of electric power transmission over long lines, processes in which can be described by the telegraph equations in the dimensionless units, have been considered. The boundary conditions are given in this case in the form of differential-integral equations. The using of the relative load parameter z allows obtaining aggregate data about working regime of a long line when you change the load under the limits $-\infty < R_s < +\infty$. Numerical method of finite differences, called as “Albatros” method, has been used during study of working modes of a long line. The method has a homogeneous structure and allows to carry out through calculation of discontinuous solutions. Wave fronts and other discontinuities values of the unknown parameters are allocated automatically and are represented in the form of large gradients of the wave field. Basic modes of transmission of power have been investigated in dependence of the values of the linear parameters of the line, of its length and of the load features. It has been shown that from electrical point of view a long line is non-uniform object, which is characterized by the singular points in order to transfer maximum power to the load. The location of these points depends on the length of the electromagnetic wave, and also depends on

parameters of the line loss. At singular points of the AC lines active power at its input (generator power) is the same as in the idle mode (XX), and also is the same as in a short-circuit current (SCC) for this singular point of the line. The line length influences mostly strongly at the mode of transmission of power. At the same time it is necessary to distinguish modes of operation of the line under conditions of the maximum line transmission capacity, of the maximum value of the coefficient of performance (COP), of the maximum value of power factor (PF), and of the maximum energy injection level in the line by a sinusoidal voltage generator. It have been presented characteristics of changing of power at the beginning and at the end of the line, of power factor, of the coefficient of performance (COP) of power transmission lines, and of the currents, in dependence on the length of line, on the line parameters and load parameters.

Keywords: long line, mode of operation, transmitted power.

1. Introduction

Currently, there are new qualitative changes in the technologies of energy supply, particularly due

to increased share of renewable energy in the consumption balance. The problem of greater involvement of renewable energy will require a new approach in the organization of production and transport of electrical energy, because it is necessary to ensure a constant balance between production and consumption, as an example, due to the parallel operation of solar power plants located in different time zones and climate zones.

Possibility of production of large amount of electricity by solar power plants has been proved by long-term experience in this field. For example, the world's most powerful solar power plant has been opened in Portugal in 2007, with the installed capacity equal to 11 MW [1]. In this case solar PV modules occupy an area of about 60 hectares. There are also other projects of solar power plants. In particular, in accordance with the elaborated in the USA project for Arizona state it is planned to construct and put into operation in 2011 solar power plant with capacity equal to 280 MW [2]. Also, technical proposal regarding construction of a solar power station in the Sahara desert in Africa has been presented, with electric power generation at the level of 100 GWh [3].

Taking into consideration continuous increasing the share of generation from renewable energy sources, reliable and sustainable energy supply can be possible by realization of concept of planetary electrical power system [4].

Trends of continuous increasing of power generation sources and of increasing of distance of transmission electric lines are typical for the whole period of development of power engineering. In particular, rated voltage of electric lines has been increased from 1.5-2 kV (1882) to 1150 kV at the present time, and distance of electric power transmission lines has been increased from 57 km to 1500 km and more [1-3, 5-7]. These quantitative changes in the structure, in the structures of circuits of transmission and distribution of electrical energy are accompanied by the emergence of new scientific

and technological problems that are not typical for small power systems.

In the consolidated regional electric power transmission systems, line distance will be comparable with the wavelength of the electromagnetic wave. Under these dimensions problems of efficiency and reliability of the system are relevant as to a whole system and also to its components. So, investigation of characteristics of transmission of electric power on a long distance is not only theoretical problem but has also big practical relevance for modern electrical power engineering.

2. Problem of statement

Creation of the big power supply systems with lingering electric lines, for example, within the frame of the West-east project, a power ring round Black sea (regional association of power supply systems) or in case of electric energy transit from Sahara solar power station to Europe [3] demands more intensive research of energy transmission features on the big distances. Besides, at creation of power corridors use of new technical solutions, for example such as superconducting electrical transmission line (ETL) or separate sites of electricity transmission on the basis of superconductivity effect, that will affect works modes of such non-uniform lines is not excluded.

Quantitative changes in structure of electropower systems (EPS) generate some question on which now is not present clear and definite answers, for example such as:

Modern methods of the processes analysis in long lines are how much exact and whether there are borders of their applicability, for example in case of line lost-free.

Under what conditions it is possible to provide the greatest transferred power, the greatest value of line EFFICIENCY, including at compensation of reactive components of loading and line.

As line heterogeneity, its length and values of longitudinal parameters influences characteristics of electric power transfer at normal and emergency operation.

The problem of the given work consists in the analysis of scale (linear) and parametrical factors influence on efficiency of electric power transfer on the big distances. At the analysis of features of long electric lines functioning, for example, as a part of regional EPS, the cable equations are used.

3. Research method

Heterogeneity of long lines and dependence of energy transmission mode of, both on loading parameters, and on line parameters are complicating factors at research of features of their work in EPS structure.

At the analysis we will start with position, that any established mode is preceded always by non-stationary wave process. The most convenient tools for the problem solution in such statement are in our opinion the method of characteristics and method of final differences "Albatross" [8]. Differential numerical scheme "Albatross" is offered and strictly proved by Institute of power engineering of Academy of Sciences of Moldova (ASM). Using this approach it is possible to solve easily and simply the cable equations for non-uniform lines and chains with any losses, the branching points, several generating both loading knots and other complicating factors [8].

In a method of characteristics it is necessary to allocate and trace a priori configuration of wave fronts (strong ruptures) which considerably become complicated eventually. Therefore the method of characteristics is expedient for using, basically, for test calculations of ideal and not deforming lines for the purpose of the control of accuracy of numerical solutions. The method of final differences "Albatross" possesses homogeneous structure and carries out the through account of explosive solutions where fronts of waves and other jumps are allocated automatically and are represented in the

form of places of the big gradients of wave field. This conclusive advantage, in combination to practically absolute accuracy, allows to carry out calculation of the transitive and established processes under uniform formulas of predictor - corrector type taking into account a various type of heterogeneities without excessive physical and geometrical idealisation of investigated electric systems and devices [8-10].

Thanks to conservatism, zero differential dissipation and minimum dispersion of the numerical scheme the calculations error on it does not collect, that allows to count non-stationary processes on the big intervals of time corresponding 300 ... 500 run of an electromagnetic wave on length of line up to reception of the established mode. Thus parameters of loadings can suddenly vary, modelling, for example, emergencies of type short circuit (SC) or rupture of line.

The method of final differences "Albatross" is based on the known cable equations of long line which well describe processes in two-wire, multiwire and coaxial lines. These structures are most widely used in practice as longitudinal-regular directing structures in which energy extends in the form of cross-section electromagnetic waves (T-waves). As is known, the field T - waves in transversal section coincides with stationary field in the same structure, and currents in conductors proceed only in longitudinal direction (conductivity currents). Therefore at the features analysis of electric processes course in long line voltage u and current intensity in conductor i can be considered as independent variables and to carry out the analysis of voltage and currents "waves" in line on the basis of the cable equations [8-10]:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0 \quad (1)$$

where L , C , R , G - longitudinal inductance, capacity, active resistance and conductivity of insulation.

At the analysis of these processes it is expedient to use system of dimensionless sizes that allows to obtain the generalised data about processes course in long lines in not dependences on frequency of current (50 or 60 Hz). The considered problem belongs to the class of mathematical physics problems with initial-boundary conditions. At the solution of such problems transition to dimensionless (normalized) sizes is carried out under formulas:

$$u = \frac{u^o}{U^o}; \quad i = \frac{i^o Z_B^o}{U^o}; \quad t = \frac{t^o}{\Delta^o}; \quad x = \frac{x^o}{\lambda^o};$$

$$R = \frac{R^o \lambda^o}{Z_B^o}; \quad R_s = \frac{R_s^o}{Z_B^o}; \quad G = G^o \lambda^o Z_B^o; \quad (2)$$

$$Z_B^o = \sqrt{L^o / C^o}; \quad a^o = 1 / \sqrt{L^o C^o}, \quad z = \frac{R_s^o - Z_B^o}{R_s^o + Z_B^o}$$

where U - some rated voltage; Z_B - wave resistance of ideal line; R_s -resistance of loading; $\lambda = a/f$ - wave length on frequency of chain power supplies source;

Δ - wave transit time on length of line equal λ : $\Delta = \lambda / a$; a - speed of electromagnetic indignations distribution along a line; the degree mark is present at dimensional sizes.

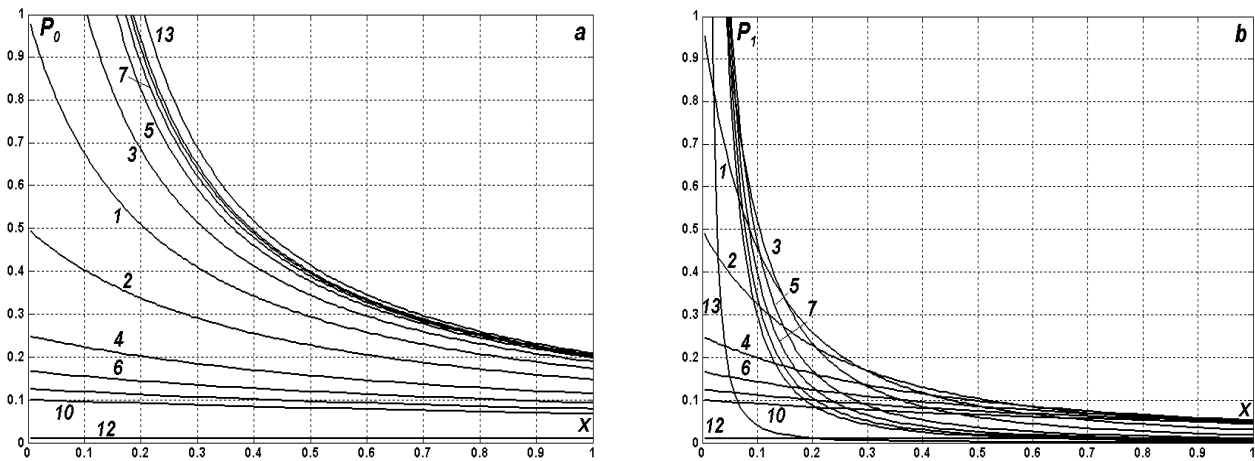


Fig. 1. Dependence of generated (a) and transferred (b) powers from length of line at various resistance of loading: $R_s = 1$ (1); 2 (2); 1/2 (3); 4 (4); 1/4 (5); 6 (6); 1/6 (7); 8 (8); 1/8 (9); 10 (10); 1/10 (11); 100 (12); 1/100 (13) and $R = 4.8, G = 0$

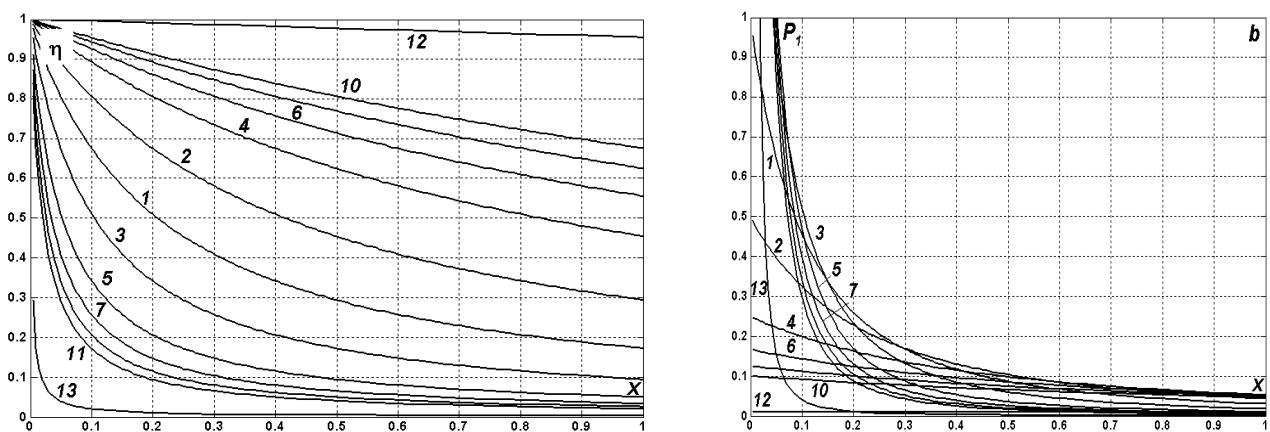


Fig. 2. Dependence of EFFICIENCY on length of a line at various resistance of loading: $R_s = 1$ (1); 2 (2); 1/2 (3); 4 (4); 1/4 (5); 6 (6); 1/6 (7); 8 (8); 1/8 (9); 10 (10); 1/10 (11); 100 (12); 1/100 (13) at $R = 4.8, G=0$ (a) and $G = R/5$ (b).

4. Features of a long lines mode

4.1. A direct current line

Let a homogeneous line of length l , having longitudinal parameters: $R > 0$; $G = 0$, it is connected to a source of direct voltage: $u = U_0$, and its reception end will close on purely active loading with resistance $Z_S = R_S$. In this case as voltage generator internal resistance we used full line resistance: $R_g = lR$. In the given chain the condition of maximum power transfer P_1 in loading R_S is known, i.e. $R_S = lR$ [11].

Results of the parametrical analysis show (fig. 1), that function of generator power $P_0(x)$ reaches limiting values in mode close to SC at $R_S \rightarrow 0$, whereas maxima of loading power function $P_1(x)$ obviously depend on length of line x .

The efficiency of direct current line monotonously decreases with increase in length of line and losses in it (fig. 2), and in case of losses in insulation decrease in value of line EFFICIENCY with growth of its length is expressed more strongly.

4.2. An alternating current line

Let's consider instant inclusion on alternating voltage of not charged line ($u = i = 0$ at $t = 0$), loaded on concentrated resistance R_S :

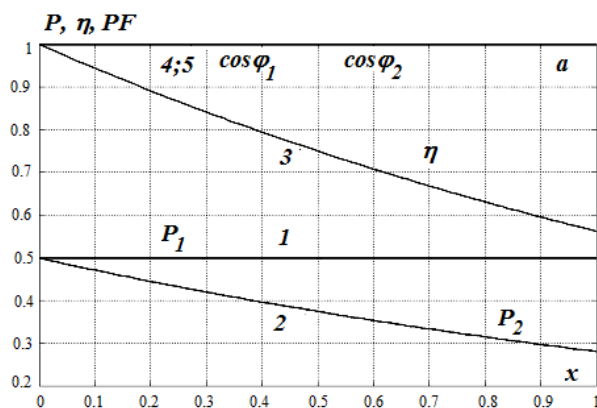


Fig. 4. Dependence of generated and transferred power, EFFICIENCY and PF of source and receiver from line length x at $Z_S = Z_0$ (a); Z_B (b); $R = 0.48$; $G = R/5$.

$$u = R_S i + L_S \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_S} \int_0^t i(\tau) d\tau \text{ at } x = l.$$

$$\begin{aligned} u &= U_0(t) \text{ at } x = 0, t > 0; \\ u &= R_S i \text{ at } x = l, t > 0. \end{aligned} \quad (3)$$

It is obvious, that at $R_S = 0$ we receive a short circuit mode: $u = 0$, and condition $R_S = \infty$ corresponds to line in idling mode (IM): $i = 0$ (loading is disconnected). Similar degenerated loadings (IM or SC) in practice meet rather seldom, however their studying represents doubtless interest as an initial step at transition to real (non-degenerated) loading modes.

Let the electric chain (fig. 3) joins during the initial moment of time $t = 0$ an external source of voltage:

$$u = u_0(t) \text{ at } x = 0,$$

and its end will close on RLC - loading:

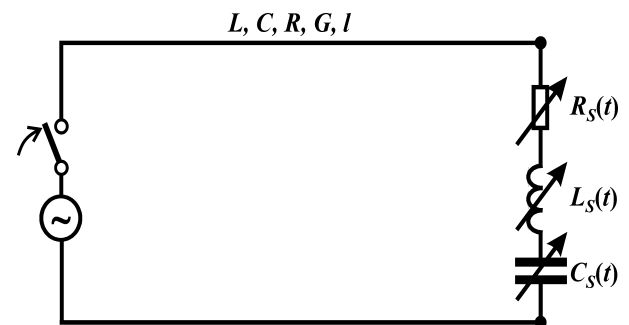
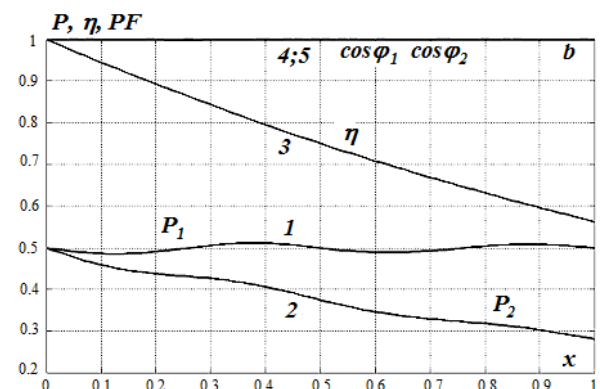


Fig. 3. Alternating voltage line with RLC-loading on the end.



It is obvious, that at $R_S = L_S = 0$, $C_S = \infty$ we receive a short circuit mode: $u = 0$, and condition

$R_S = \infty$ corresponds to line idling: $i=0$ (loading is disconnected).

At sinusoidal voltage $u = U_0 \sin(2\pi ft)$ power rating value we defined from relation $P = \frac{U_0^2}{2Z_B}$ in dimensional or $P = \frac{1}{2}$ in dimensionless kind. At constant value of variable voltage amplitude on line input: $U_m = \text{const} = U_0$ we received $P = \frac{U_0^2}{Z_B}$ or $P = 1$

On fig. 4 change of average (dimensionless) values of generated and transferred power (curves 1; 2), EFFICIENCY (3), power factor (PF) ($\cos \varphi$) of source and receiver (4; 5) is shown depending on line length x at $Z_S = Z_0$ (a); Z_B (b); $R = 0.48$, $G = R/5$, where Z_0 -complex wave resistance at which the line works in mode of running waves; Z_B - wave resistance at which the line works in mode of the mixed waves and which is purely active resistance.

Apparently from schedules with increase of line length transferred power and EFFICIENCY monotonously decrease, and generated power

remains practically invariable, testing only insignificant (within 1 ... 3 %) fluctuation at $Z_S = Z_B$.

On fig. 5 dependence of investigated values on line length x is presented at $Z_S = Z_B + j\omega L_S$ (a); $Z_B - j / (\omega C_S)$ (b); $L_S = 1/8$ (0.66 H); $C_S = 1/5$ (15.23 mkF); $R = 0.48$; $G = R/5$. Presence of reactive elements in loading resistance leads to sharp change of chain entrance resistance and as consequence all values characterising process of power transfer by alternating current test fluctuations for tens percent. For a half-wave line transferred power and EFFICIENCY are maximum, when loading on its reception end purely active. In case of line with losses (fig. 5b) wavy character of power given by the generator in network is similar as for line lost-free.

With increase of line length, power function of the generator aspires to the established value at increase of longitudinal transversal active resistance of this line faster. Thereof there is an easing of scale factor influence on process of transfer to line of active power by generator.

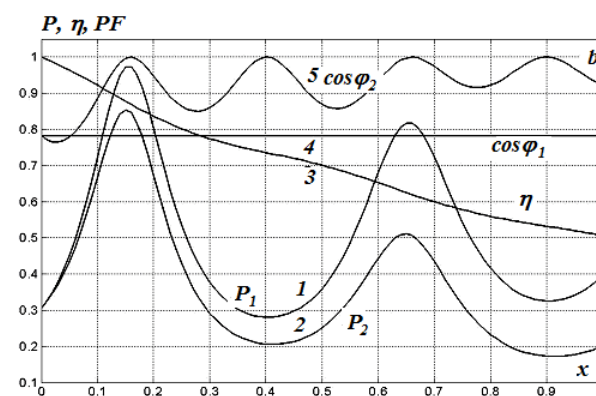
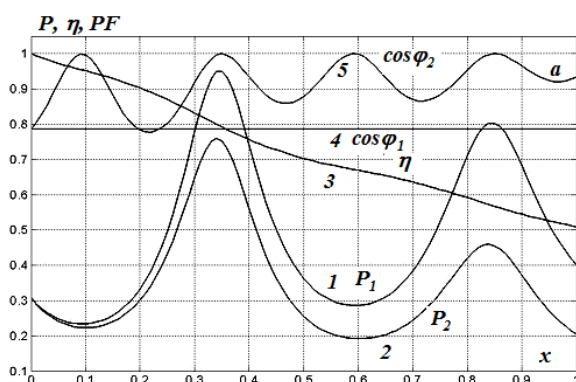
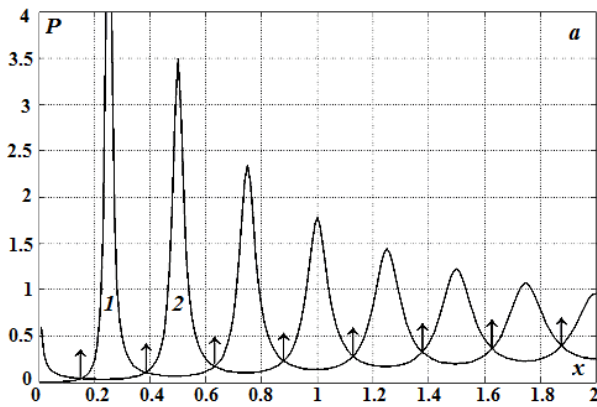
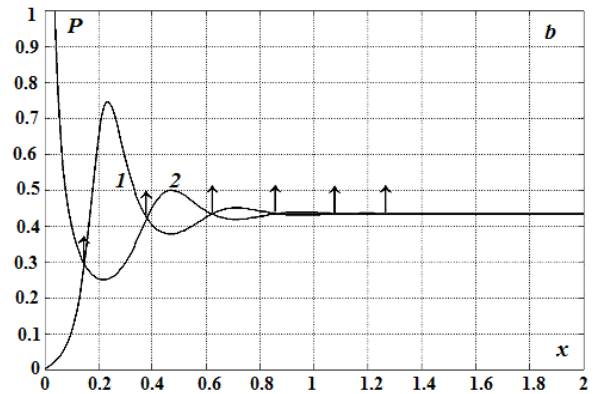


Fig. 5. Dependence of generated and transferred power, EFFICIENCY and PF of source and receiver from line length x at $Z_S = Z_B + j \omega L_S$ (a); $Z_B - j / (\omega C_S)$ (b); $L_S = 1/8$; $C_S = 1/5$; $R = 0.48$; $G = R/5$.



$h = 0.1517, l_2 = 0.3859, l_3 = 0.6317, l_4 = 0.8798, l_5 = 1.1287, l_6 = 1.3780, l_7 = 1.6275, l_8 = 1.8772$



$l_1 = 0.1481, l_2 = 0.3809, l_3 = 0.6211, l_4 = 0.8619, l_5 = 1.1027, l_6 = 1.3434, l_7 = 1.5842, l_8 = 1.8250$

Fig. 6. Dependence of generator power P_0 on line length x in IM (1) and SC mode (2) at $R = 0.48$ (a); $R = 4.8$ (b); $G = R/5$.

Research of generator power change given to lines in IM and SC mode shows, that there are special points (length of line) for which this power is identical on value both to IM and SC mode in the given section (fig. 6 - special points are designated by arrows).

Growth of longitudinal active resistance R reduces number of such points. Generator active power function $P_0(x)$ connected to line, for this condition reaches faster the established value at line length increase. Hence, for generator instant power amplitude condition $P_{02}(x) < P_{01}(x)$ for $R_2 > R_1$, where R_1, R_2 - running resistance of long line (fig. 6) is satisfied.

It is established also, that in a vicinity of line special points active longitudinal resistance does not influence value of power given to lines by generator. For example, at increase in longitudinal active resistance from 0.48 to 4.8 relative units for the line lengths defined by co-ordinates of special points placement, identical values of generator active power connected to such line are received.

Unlike of direct voltage line where idling generator power always is less, than at short circuit, here we have on 4 points of crossing of these curves on each piece of length of the line, equal to λ . Co-ordinates of these points on line length are next: $l_1 = 0.1481$; $l_2 = 0.3809$; $l_3 = 0.6211$; $l_4 = 0.8619$; $l_5 = 1.1027$; $l_6 = 1.3434$; $l_7 = 1.5842$; $l_8 = 1.825$.

The parametrical analysis of electric energy transfer processes on line length has shown in the electric plan, that the transmission line is non-uniform object. Generator working conditions in the line beginning depends on many factors: line wave length, loading connection point, loading character and devices for reactive power compensation, the connection scheme of compensating device, transformers for voltage increase and-or drop in line, schemes of loading connection to line and both in any points and special points of long line.

As an example on fig. 7 the equivalent circuit of long line with indication of special points of loadings connection, compensating devices and transformers providing transfer of the greatest power in loading is shown.

For any not deforming line: $RC = GL$ generators powers at IM and SC mode coincide in points $x = \lambda/8, 3\lambda/8, 5\lambda/8$ etc. If $RC > GL$ owing to diffraction of waves these curves are displaced little to the right: $x = 0.15\lambda, 0.386\lambda, 0.63\lambda$. From here follows, that the maximum selection power from alternating voltage line on site:

$0.15\lambda \leq x \leq 0.386\lambda$ it is possible in a mode close to IM, and on sites:

$0 < x \leq 0.15\lambda$ and $0.386\lambda \leq x \leq 0.63\lambda$ in a mode close to SC. Such situation repeats through each pieces of length the lines equal approximately $\lambda/4$.

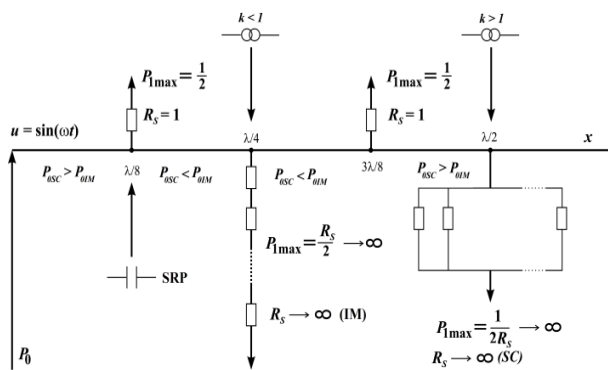


Fig.7. The special points of a long line and suggested technical solutions to incorporate compensating devices, transformers and loads to the line.

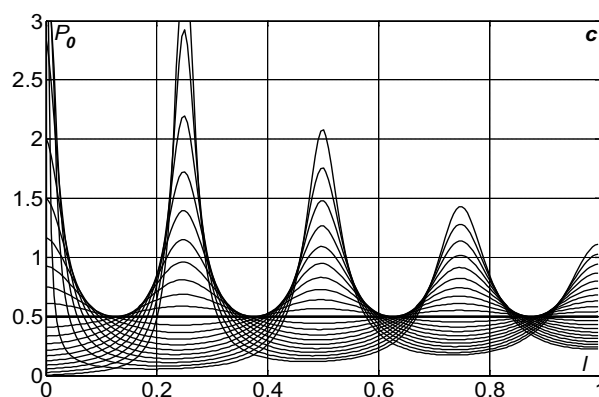


Fig. 8. Character of active power change on input of line with losses in function from its length at co-ordinated loadings.

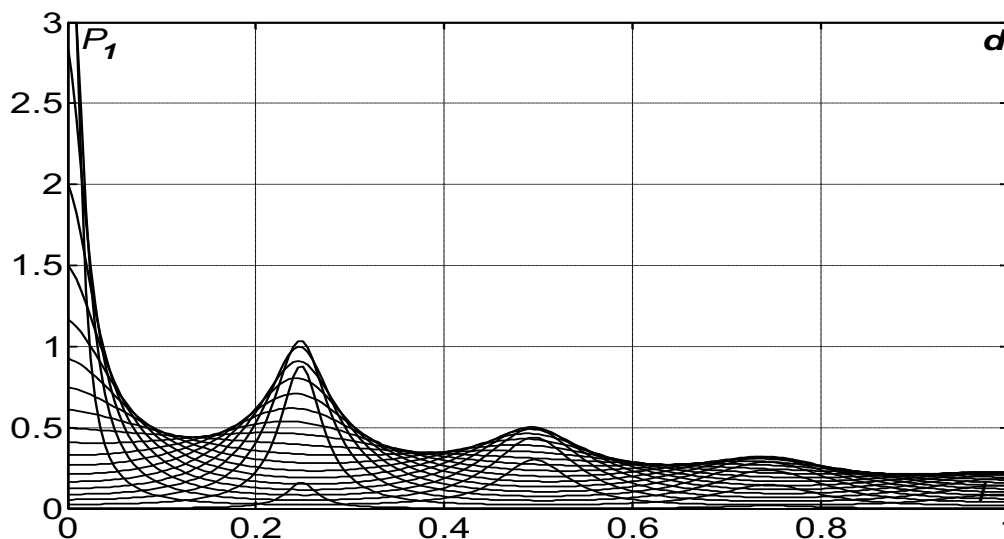


Fig. 9. Character of active power change (transit) on the line end with losses in function from its length at co-ordinated loading

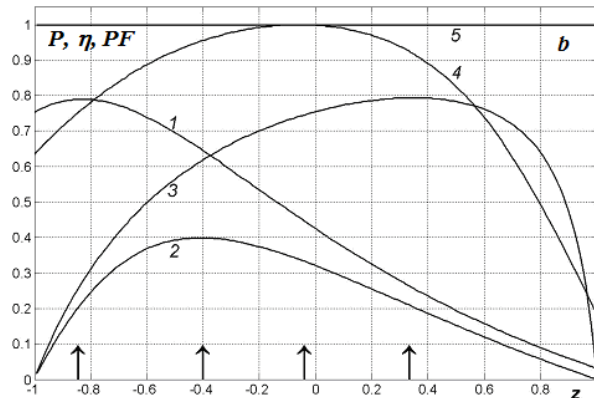
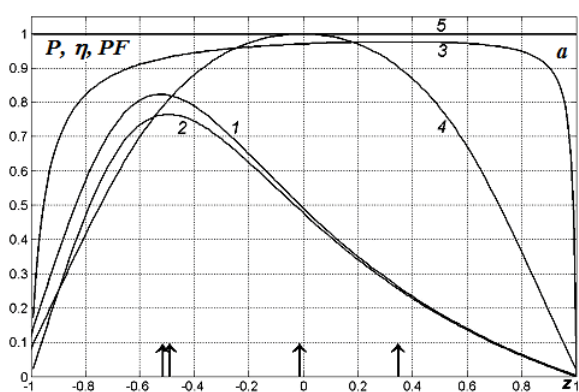


Fig. 10. Dependence of generated and transferred power, EFFICIENCY and PF of source and receiver on resistance of loading R_S at $l = 0.0516$; $R = 0.48$ (a); 4.8 (b); $G = R/5$; $Z_S = R_S$, where 1 - P_1 ; 2 - P_2 ; 3 - η ; 4 - $\cos\phi_1$; 5 - $\cos\phi_2$

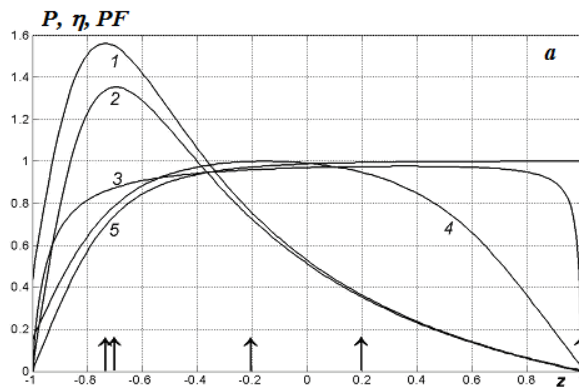


Fig. 11. Dependence on resistance loadings R_S of generated (1) and transferred powers (2), EFFICIENCY (3) and PF source (4) and the receiver (5) at $l = 0.0516$; $R = 0.48$; $G = R/5$; $Z_S = R_S - j / (\omega C_S)$; $C_S = 1$

On fig. 8 and 9 the generalised data about character of power change on input and output ends of line with losses (at various losses) in case of the co-ordinated loading are presented.

It is necessary to notice, that though line losses influence value of transferred power, but there are such points in line for which influence of line losses on value of the power transferred in loading does not come to light. Such modes are possible both in relatively short lines, and in lines comparable with wave length.

On fig. 10 change of generated and transferred power, EFFICIENCY and PF of source and receiver (curves 1-5) depending on parameter z is presented at $l = 0.0516$; $R = 0.48$ (a); 4.8 (b); $G = R/5$; $Z_S = R_S$. These schedules visually illustrate that fact, that maxima of all functions investigated here are reached at various values of loading resistance R_S . With increase in line losses it is observed «run up» of critical resistance for generated and transferred power whereas points of maximum for EFFICIENCY and PF remain practically motionless. Thus, at variation of parameter R_S for any piece of line length it is possible to receive full representation about power overflows that allows to choose an optimum mode of line proceeding from those or other criteria.

The Fig. 11 illustrates dependence of generated and transferred power, EFFICIENCY and PF of

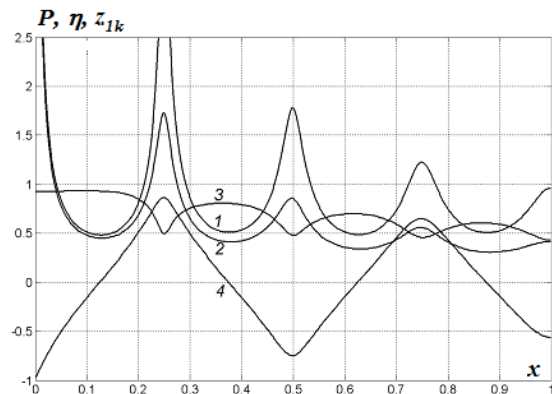


Fig. 12. Dependence on line length x of generated (1), maximum transferred (2) powers EFFICIENCY (3) and critical resistance z_{1k} (4) at $R = 0.48$; $G = R/5$.

source and receiver on parameter z at $Z_S = R_S - j / (\omega C_S)$; $C_S = 1$ (17.57mkF). Longitudinal active resistance and active conductivity of line in relative units have values: $R = 0.48$, $G = R/5$. Longitudinal compensation of loading parameters for this line length increases the maximum transferred power, but reduces EFFICIENCY and $\cos \varphi$.

On fig. 12 dependence of generated and maximum transferred power, EFFICIENCY and critical resistance z_{1k} from line length (curves 1-4) is shown.

The increase (reduction) of transferred power in process of change of line length always is accompanied by reduction (increase) in EFFICIENCY. For a quarter wave line the power maximum takes place in mode close to IM ($R_S = 13.93 Z_B$), and for a half-wave line in mode close to SC ($R_S = 0.14 Z_B$).

Conclusions

1. Within the frame of the tendency of regional and inter-regional power systems development the urgency of working out of effective methods of modes research in such chains repeatedly increases. Research of influence of various factors what line and loading parameters, waves dissipation and dispersion are on power losses

allows to develop measures on efficiency increase of ETL functioning as a part of regional power connections.

2. The most significant influencing parameter on mode of power transfer on long lines is its length.
3. It is necessary to distinguish line operating modes at the maximum transferred power, EFFICIENCY, PF and the maximum return of

energy by the generator of sinusoidal voltage in the given line.

4. Researches in the given direction has not only the scientific importance, but also practical as it is possible is proved to develop the most rational ways of energy transmission on high voltage lines and to solve others problems from area of diagnostics, coordination of insulation, calculation of losses, as in stationary, and non-stationary (transitive) modes.

References

1. In Portugal the world's largest solar power station has opened. <http://www.membrana.ru/lenta/index.html?7077>.
2. Arizona builds the largest solar power station on the Earth. <http://www.membrana.ru/lenta/index.html?8014>.
3. Energy from Sahara will "shine" the world. <http://www.ecomagazin.ro/energia-din-sahara-va-%e2%80%9elumina%e2%80%9c-lumea-2/>
4. Covaleov G.F., Lebedeva L.M. Planetary electropower system. Energy, 2006, №9 p.p. 27-34/ <http://courier.com.ru/energy/en0906kovalev.htm>.
5. Alexandrov G.N., Le Thani Bak. Reduction of power losses in long transmission lines with controlled reactors. -Electricity, 2007, №3, p.p. 8-15.
6. Vershkov V.A., Nahapetean K.T., Olishevskii O.V., Sovalov S.A., Fotin V.P., Scerbakov V.K. Complex tests of half-wave electricity transmission in 500 kV network of the European part of the USSR.- Electricity, 1968, №8, p.p.10-16.
7. Ziliberman S.M., Samorodov G.I. Possible prospects of electric power import in Republic Moldova from the Tyumen region. Conference works «Power of Moldova 2005», Kishinev: 2005, Printing house of ASM, p.p.104-110.
8. Rimschii V.X., Berzan V. P, Patsyuk V. I, Karcheva N.F., Andros I.V. The wave phenomena in non-uniform lines. Volume 4. Parametrical chains / AS of Moldova. Institute of power. Chisinau: Print house of ASM, 2008.-552p.
9. Rimschii V.X., Berzan V. P, Tirsu M. S. The wave phenomena in non-uniform lines. Vol.1. The theory of potential and current waves distribution. Under edition Rimschii V.X. - Chisinau: Printing house of ASM, 1997. – 298p.
10. Rimschii v.X., Berzan V. P, Patsyuk V. I, etc. How to increase transferred capacity in tens times. – Chisinau: Print house of ASM, 2007. – 178p.
11. Bessonov L.A.. Theoretical bases of electrical engineers. Electric chains /Textbook for The higher technical educational institutions. - M: the Higher school, 1984. – 559p.

О некоторых особенностях режима передачи мощности по длинной линии электропередачи

Berzan V.P., Rimschi V.X., Tirsu M.S., Patsyuk V.I., Uzun M.N.

Институт энергетики Академии наук Молдовы

E-mail: berzan@ie.asm.md

Аннотация. Рассматриваются особенности передачи электрической энергии по длинным линиям, процессы в которых описываются телеграфными уравнениями в системе безразмерных единиц. Граничные условия задаются в виде дифференциально-интегральных уравнений. Использование относительного параметра нагрузки z , позволило получить обобщенные данные о режиме работы длинной линии при изменении ее нагрузки R_S в пределах $-\infty < R_S < +\infty$.

При исследовании режимов длинной линии использован численный метод в конечных разностях, названный авторами метод «Альбатрос». Метод обладает однородной структурой и осуществляет сквозной счет разрывных решений. Фронты волн и другие скачки значений искомым параметров выделяются автоматически и представляются в виде мест больших градиентов волнового поля.

Исследованы режимы передачи мощности в зависимости от значений погонных параметров линии, ее длины и характера нагрузки. Показано, что в электрическом плане длинная линия является неоднородным объектом, который характеризуется особыми точками касательно условий передачи максимальной мощности в нагрузку.

Расположение этих точек зависит как от длины электромагнитной волны, так и от параметров потерь линии. В особых точках линий переменного тока активная мощность на ее входе (генераторная) одинакова по значению как в режиме холостого хода (ХХ), так и в режиме короткого замыкания (КЗ) в данной, особой, точки линии.

Длина линии наиболее сильно влияет на режим передачи мощности. Следует различать режимы работы линии при максимальной передаваемой мощности, максимальном значении коэффициента полезного действия (КПД), максимальном значении коэффициента мощности (КМ) и максимальной инъекции энергии в линии генератором синусоидального напряжения.

Представлены характеристики изменения мощностей в начале и в конце линии, коэффициента мощности, коэффициента полезного действия ЛЭП, токов в зависимости от длины, параметров линии и параметров нагрузки.

Ключевые слова: длинная линия, режим, передаваемая мощность.

1. Введение

В настоящее время происходят новые качественные изменения в технике обеспечения

энергией, в частности, из-за увеличения доли возобновляемой энергии в балансе потребления. Проблема более широкого вовлечения возобновляемой энергии потребует нового подхода в организации производства и транспорта электрической энергии, поскольку необходимо обеспечить постоянный баланс между производством и потреблением, например, за счет параллельной работы солнечных электростанций, расположенных в различных часовых и климатических поясах.

Возможность производство в больших количествах электроэнергии солнечными электростанциями подтверждается накопленным опытом в этой области. Например, в Португалии (2007 г.) открылась самая мощная в мире солнечная электростанция [1], установленной мощностью 11 МВт. Солнечные PV модули занимают площадь в 60 га. Известны и другие проекты таких электростанций, например, планируемый к реализации в США (штат Аризона) проект, предусматривает строительство и пуск в 2011 г. солнечной электростанции мощностью 280 МВт [2], а также предложение о строительстве солнечной электростанции в пустыне Сахара в Африке [3]. В рамках последнего проекта, мощность источник генерации составит 100 ГВт.

Надежное и устойчивое энергоснабжение при увеличении доли генерации на основе возобновляемых источников энергии возможно при реализации концепции планетарной электроэнергетической системы [4].

Тенденция увеличения мощности источников генерации и дальности передачи электрической энергии характерна для всего периода развития электроэнергетики. Например, напряжение электрических линий увеличилось с 1,5—2 кВ (1882 г.) до 1150 кВ в настоящее время, а расстояние передачи электрической энергии с 57 км до 1500 км и более [1-3, 5-7]. Количественные изменения в структуре, в схемах передачи и распределения электрической энергии сопровождаются и возникновением новых научно-технических проблем, которые не

характерны для малоразмерных электроэнергетических систем.

В консолидированных региональных электроэнергетических системах расстояния передачи мощности будут соизмеримы с длиной электромагнитной волны, а при таких размерностях актуальными будут проблемы эффективности и надежности функционирования как системы в целом, так и ее отдельных компонент. Поэтому изучение особенностей передачи электрической мощности на дальние расстояния представляет не только теоретический интерес, но представляет интерес и для практической электроэнергетики.

2. Постановка задачи

Создание больших энергосистем с протяжными электрическими линиями, например, в рамках проекта Запад-Восток, энергетического кольца вокруг Черного моря (региональное объединение энергосистем) или в случае транзита электрической энергии от солнечной электростанции из Сахары в Европу [3] требует более глубокого исследования особенностей передачи энергии на большие расстояния. Кроме того, при создании энергетических коридоров не исключено использование новых технических решений, например таких, как сверхпроводящие ЛЭП или отдельных участков электропередачи на основе эффекта сверхпроводимости, что повлияет на режимы работ таких неоднородных линий.

Количественные изменения в структуре электроэнергетических систем (ЭЭС) порождают ряд вопросов, на которых в настоящее время нет ясных и четких ответов, например таких как:

1. Насколько точны современные методы анализа процессов в длинных линиях и есть ли границы их применимости, например в случае линии без потерь.

2. При каких условиях можно обеспечить наибольшую передаваемую мощность, наибольшее значение КПД линии, в том числе и при компенсации реактивных составляющих нагрузки и линии.

3. Как влияет неоднородность линии, ее длина и значения погонных параметров на характеристики передачи электрической мощности при нормальных и аварийных режимах.

Задача данной работы состоит в анализе влияния масштабного (линейного) и параметрических факторов на эффективность передачи электрической мощности на большие расстояния.

3. Метод исследования

Неоднородность длинных линий и зависимость режима передачи энергии, как от параметров нагрузки, так и от параметров самой линии являются усложняющими факторами при исследовании особенностей их работы в составе ЭЭС.

При анализе особенностей функционирования длинных электрических линий, например, в составе региональных ЭЭС, воспользуемся телеграфными уравнениями.

При анализе будем исходить из положения, что любому установившемуся режиму всегда предшествует нестационарный волновой процесс. Наиболее удобными инструментами для решения задачи в такой постановке являются на наш взгляд метод характеристик и метод конечных разностей «Альбатрос» [8]. Разностная численная схема «Альбатрос» предложена и строго обоснована Институтом энергетики АНМ. Используя этот подход можно легко и просто решать телеграфные уравнения для неоднородных линий и цепей с произвольными потерями, точками ветвления, несколькими генераторными и нагрузочными узлами и другими усложняющими факторами [8].

В методе характеристик необходимо априори выделять и отслеживать конфигурацию волновых фронтов (сильных разрывов), которые значительно усложняются с течением времени. Поэтому метод характеристик целесообразно использовать, в основном, для тестовых расчетов идеальных и неискажающих линий с целью контроля точности численных решений. Метод конечных разностей «Альбатрос» обладает однородной структурой и осуществляет сквозной счет разрывных решений, где фронты волн и другие скачки выделяются автоматически и представляются в виде мест больших градиентов волнового поля. Именно это неоспоримое преимущество, в сочетании с практически абсолютной точностью, позволяет осуществить расчет переходных и установившихся процессов по единообразным формулам типа предиктор–корректор с учетом различного рода неоднородностей без излишней физической и геометрической идеализации исследуемых электрических систем и устройств [8-10].

Благодаря консервативности, нулевой разностной диссипации и минимальной дисперсии численной схемы ошибка вычислений по ней не накапливается, что позволяет рассчитывать нестационарные процессы на больших интервалах времени, соответствующих 300...500 пробегов электромагнитной волны по длине линии вплоть до получения установившегося режима. При этом параметры нагрузок могут внезапно меняться, моделируя, к примеру, аварийные ситуации типа КЗ или разрыва линии.

Метод конечных разностей «Альбатрос» базируется на известных телеграфных уравнениях длинной линии, которые хорошо описывают процессы в двухпроводных, многопроводных и коаксиальных линиях. Эти структуры наиболее широко используются на практике в качестве продольно-регулярных направляющих структур, в которых энергия распространяется в виде поперечных электромагнитных волн (Т-волны). Как

известно, поле Т- волны в поперечном сечении совпадает со стационарным полем в той же структуре, а токи в проводниках протекают только в продольном направлении (токи проводимости). Поэтому при анализе особенностей протекания электрических процессов в длинной линии напряжение u и силу тока в проводнике i можно рассматривать в качестве независимых переменных и проводить анализ “волн” напряжений и токов в линии на основе телеграфных уравнений [8-10]:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + Ri = 0; \quad C \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} + Gu = 0, \quad (1)$$

где L , C , R , G – погонные индуктивности, емкости, активные сопротивления и проводимости изоляции.

При анализе этих процессов целесообразно использовать систему безразмерных величин, что позволяет получать обобщенные данные о протекании процессов в длинных линиях в не зависимости от частоты тока (50 или 60 Гц). Рассматриваемая задача относится к классу

задач математической физике с начально-краевыми условиями. При решении таких задач переход к безразмерным (нормированным) величинам осуществляется по формулам:

$$u = \frac{u^o}{U^o}; \quad i = \frac{i^o Z_B^o}{U^o}; \quad t = \frac{t^o}{\Delta^o};$$

$$R = \frac{R^o \lambda^o}{Z_B^o} \quad x = \frac{x^o}{\lambda^o}; \quad R_S = \frac{R_S^o}{Z_B^o}; \quad (2)$$

$$G = G^o \lambda^o Z_B^o; \quad Z_B^o = \sqrt{L^o / C^o};$$

$$a^o = 1 / \sqrt{L^o C^o}; \quad z = \frac{R_S^o - Z_B^o}{R_S^o + Z_B^o},$$

где U – некоторое номинальное напряжение; Z_B – волновое сопротивление идеальной линии; R_S – сопротивление нагрузки; $\lambda = a/f$ – длина волны на частоте источника электропитания цепи; Δ – время пробега волны по длине линии, равной λ : $\Delta = \lambda/a$; a – скорость распространения электромагнитных возмущений вдоль линии; значок градуса присутствует у размерных величин.

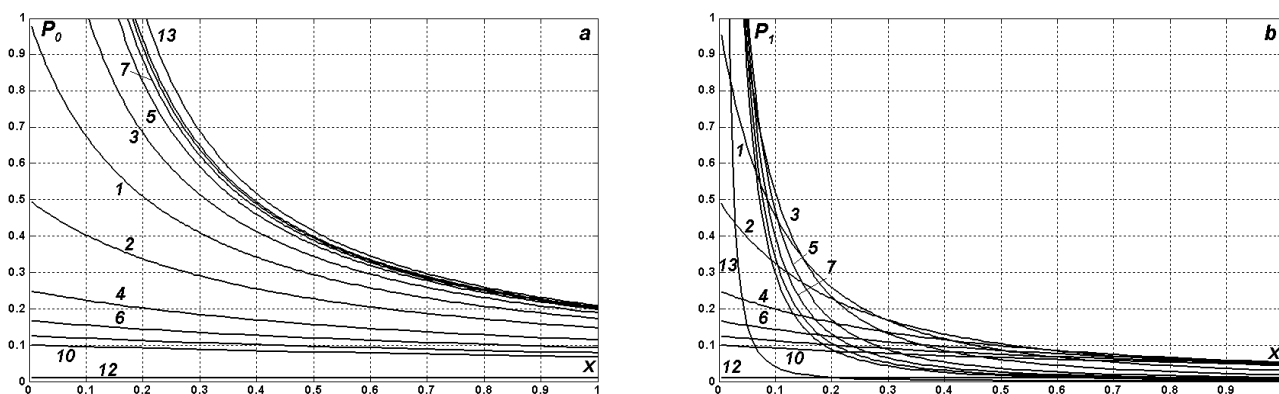


Рис.1. Зависимость генерируемой (а) и передаваемой (б) мощности от длины линии при различных сопротивлениях нагрузки: $R_S = 1$ (1); 2(2); 1/2 (3); 4 (4); 1/4 (5); 6 (6); 1/6 (7); 8 (8); 1/8 (9); 10 (10); 1/10 (11); 100 (12); 1/100 (13) и $R = 4.8$, $G = 0$

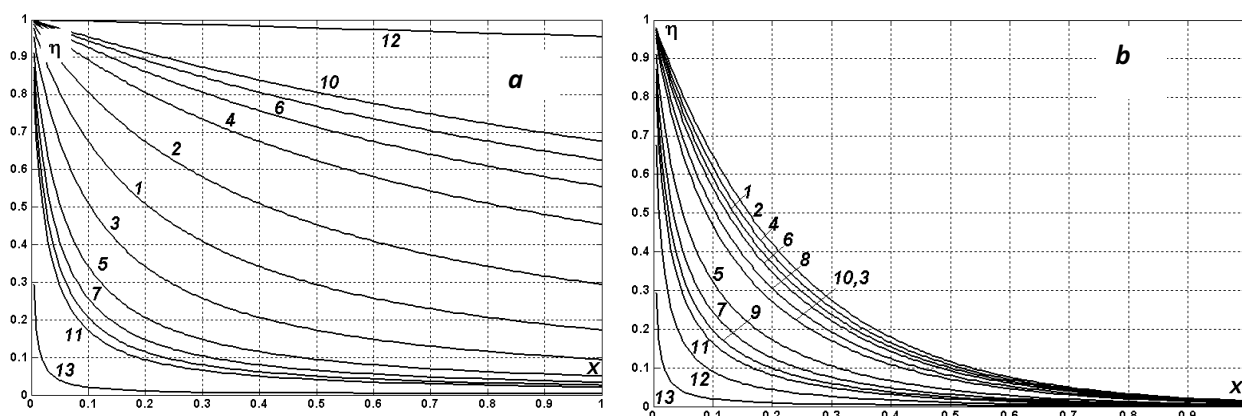


Рис.2. Зависимость КПД от длины линии при различных сопротивлениях нагрузки: $R_S = 1$ (1); 2(2); 1/2 (3); 4 (4); 1/4 (5); 6 (6); 1/6 (7); 8 (8); 1/8 (9); 10 (10); 1/10 (11); 100 (12); 1/100 (13) при $R = 4.8, G=0$ (a) и $G = R/5$ (b)

4. Особенности режима длинных линий

4.1. Линия постоянного тока

Пусть однородная линия длиной l , имеющая погонные параметры: $R > 0; G = 0$, подключена к источнику постоянного напряжения: $u = U_0$, а ее приемный конец замкнут на чисто активную нагрузку с сопротивлением $Z_S = R_S$. В этом случае в качестве внутреннего сопротивления генератора напряжения используем полное сопротивление линии: $R_g = lR$. В данной цепи условие передачи максимальной мощности P_1 в нагрузку R_S известно, т.е. $R_S = lR$ [11].

Результаты параметрического анализа показывают (рис.1), что функция мощности генератора $P_0(x)$ достигает предельных значений в режиме, близком к КЗ при $R_S \rightarrow 0$, тогда как максимумы функции мощности нагрузки $P_l(x)$ явно зависят от длины линии x .

Коэффициент полезного действия линии постоянного тока монотонно убывает с увеличением длины линии и потерь в ней (рис. 2), причем в случае потерь в изоляции снижение значения КПД линии с ростом ее длины проявляется более сильно.

4.2. Линия переменного тока

Рассмотрим мгновенное включение на переменное напряжение незаряженной линии ($u = i = 0$ при $t = 0$), нагруженной на сосредоточенное сопротивление R_S :

$$u = U_0(t) \quad \text{при} \quad x = 0, t > 0;$$

$$u = R_S i \quad \text{при} \quad x = l, t > 0. \quad (3)$$

Очевидно, что при $R_S = 0$ получаем режим короткого замыкания: $u = 0$, а условие $R_S = \infty$ соответствует холостому ходу линии: $i = 0$ (нагрузка отключена). Подобные вырожденные нагрузки (ХХ или КЗ) на практике встречаются сравнительно редко, однако их изучение представляет несомненный интерес как исходная ступень при переходе к реальным (невыврожденным) нагрузочным режимам.

Пусть электрическая цепь (рис.3) присоединяется в начальный момент времени $t = 0$ к внешнему источнику напряжения

$$u = u_0(t) \quad \text{при} \quad x = 0,$$

а ее конец замкнут на RLC – нагрузку:

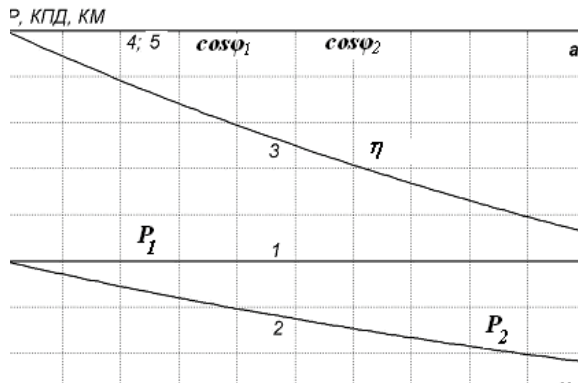
$$u = R_S i + L_S \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_S} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad \text{при} \quad x = l.$$

Очевидно, что при $R_S = L_S = 0, C_S = \infty$ получаем режим короткого замыкания: $u = 0$, а условие $R_S = \infty$ соответствует холостому ходу линии: $i = 0$ (нагрузка отключена).

При синусоидальном напряжении $u = U_0 \sin(2\pi ft)$ номинальное значение мощности определяем из соотношения $P = \frac{U_0^2}{2Z_B}$ в

размерном или $P = \frac{1}{2}$ в безразмерном виде. При постоянном значении амплитуды переменного напряжения на входе линии: $U_m = const = U_0$ получаем $P = \frac{U_0^2}{Z_B}$ или $P = 1$.

На рис. 4 показано изменение средних (безразмерных) значений генерируемой и передаваемой мощности (кривые 1;2), КПД (3), КМ ($\cos \varphi$) источника и приемника (4;5) в зависимости от длины линии x при $Z_S = Z_0$ (a); Z_B (b); $R = 0.48$, $G=R/5$, где Z_0 – комплексное волновое сопротивление, при котором линия работает в режиме бегущих волн; Z_B – волновое сопротивление, при котором линия работает в режиме смешанных волн и которое является чисто активным сопротивлением.



Как видно из графиков с увеличением длины линии передаваемая мощность и КПД монотонно убывают, а генерируемая мощность остается практически неизменной, испытывая лишь незначительные (в пределах 1...3 %) флуктуации при $Z_S = Z_B$.

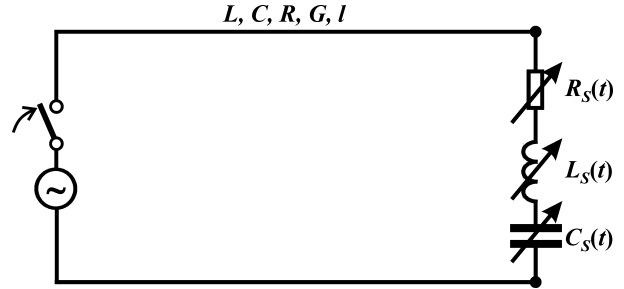


Рис 3. Линия переменного напряжения с RLC-нагрузкой на конце

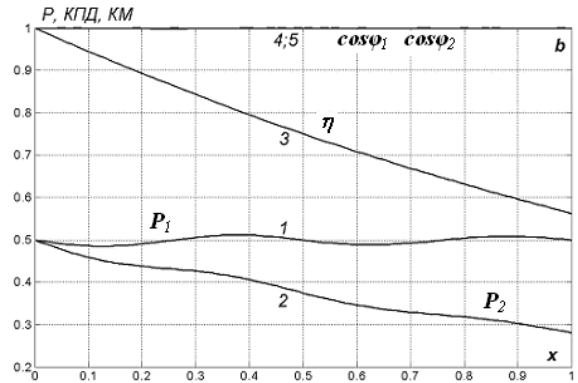


Рис. 4. Зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от олины линии x при $Z_S = Z_0$ (a); Z_B (b); $R = 0.48$; $G = R/5$.

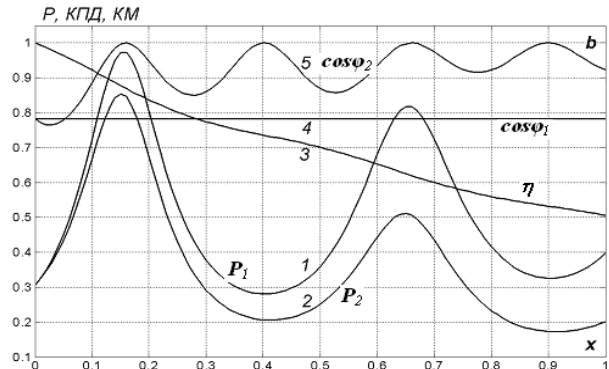
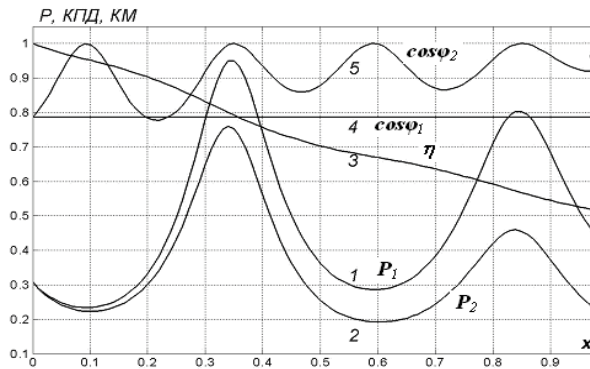


Рис. 5. Зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от длины линии x при $Z_S = Z_B + j\omega LS$ (a); $Z_B - j/(\omega CS)$ (b); $LS = 1/8$; $CS = 1/5$; $R = 0.48$; $G = R/5$.

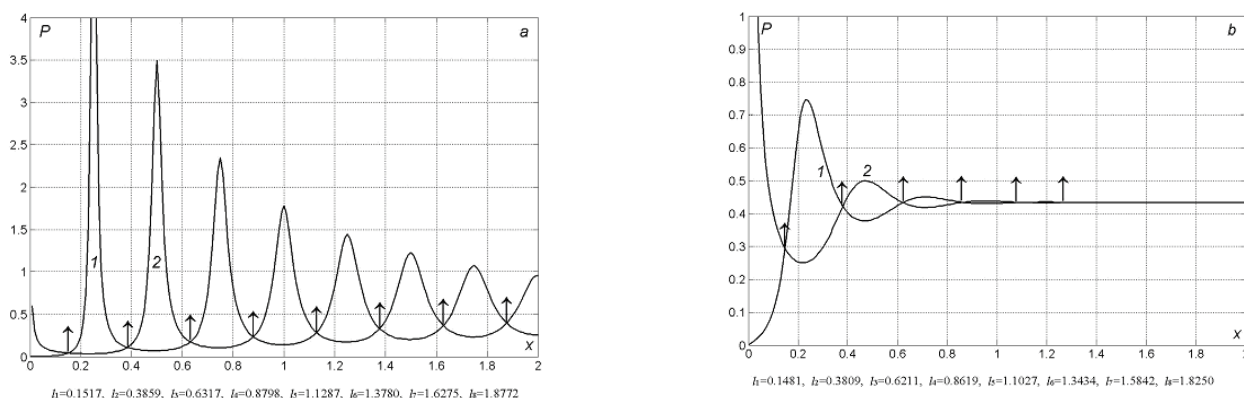


Рис. 6. Зависимость мощности генератора P_0 от длины линии x в режиме XX (1) и КЗ (2) при $R = 0.48$ (a); $R = 4.8$ (b); $G = R/5$.

На рис. 5 представлена зависимость исследуемых величин от длины линии x при $Z_S = Z_B + j\omega L_S$ (a); $Z_B - j/(\omega C_S)$ (b); $L_S = 1/8$ (0.66 Гн); $C_S = 1/5$ (15.23 мкФ); $R = 0.48$; $G = R/5$. Наличие реактивных элементов в нагрузочном сопротивлении приводит к резкому изменению входного сопротивления цепи и как следствие все величины, характеризующие процесс передачи мощности переменным током испытывают колебания на десятки процентов. Для полуволновой линии передаваемая мощность и КПД являются максимальными, когда нагрузка на ее приемном конце чисто активная.

В случае линии с потерями (рис.5b) волнообразный характер отдаваемой генератором мощности в сети подобен как для линии без потерь. С увеличением длины линии, функция мощности генератора быстрее стремится к установившемуся значению при увеличении продольного погонного активного сопротивления этой линии. Вследствие этого происходит ослабление влияния масштабного фактора на процесс передачи в линию активной мощности генератором.

Исследование изменения мощности генератора отдаваемой в линии в режиме XX и КЗ показывает, что имеются особые точки (длины линии) для которых эта мощность одинакова по значению как для режима XX, так

и для режима КЗ линии в данном сечении (рис.6 - особые точки обозначены стрелками). Рост погонного активного сопротивления R уменьшает число таких точек. Функция $P_0(x)$ активной мощности генератора, подключенного к линии, при этом условии быстрее достигает установившегося значения при увеличении длины линии. Следовательно, для амплитуды мгновенной мощности генератора выполняется условие $P_{02}(x) < P_{01}(x)$ для $R_2 > R_1$, где R_1, R_2 - погонные сопротивления длинной линии (рис.6).

Установлено также, что в окрестности особых точек линии активное погонное сопротивление не влияет на значение мощности отдаваемой в линии генератором. Например, при увеличении погонного активного сопротивления с 0.48 до 4.8 относительных единиц для длин линии, определяемых координатами расположения особых точек, получены одинаковые значения активной мощности генератора подключенного к такой линии.

В отличие от линии постоянного напряжения, где мощность генератора на холостом ходу всегда меньше, чем при коротком замыкании, здесь имеем по 4 точки пересечения этих кривых на каждом отрезке длины линии, равном λ . Координаты этих точек по длине линии следующие:

$$l_1 = 0.1481; l_2 = 0.3809; l_3 = 0.6211; l_4 = 0.8619; \\ l_5 = 1.1027; l_6 = 1.3434; l_7 = 1.5842; l_8 = 1.825$$

Параметрический анализ процессов передачи электрической энергии по длинной линии показал в электрическом плане, что линия электропередачи является неоднородным объектом. Режим работы генератора в начале линии зависит от многих факторов, таких как: волновой длины линии, точки подключения нагрузки, характера нагрузки и устройств для компенсации реактивной мощности, схемы подключения компенсирующего устройства трансформаторов для повышения и/или понижения напряжения в линии, схемы подключения нагрузки к линии и в произвольных точках и в особых точках длинной линии.

В качестве примера на рис. 7 показана схема замещения длинной линии с указанием особых точек подключения нагрузок, компенсирующих устройств и трансформаторов, обеспечивающих передачу наибольшей мощности в нагрузке.

Для любой неискажающей линии для которой выполняются условие $RC = GL$, мощности генераторов при XX и КЗ совпадают в точках $x = \lambda/8, 3\lambda/8, 5\lambda/8$ и т.д. Если же выполняется условие $RC > GL$, то вследствие дифракции волн, кривые мощности генератора смещаются несколько вправо: $x = 0.15\lambda, 0.386\lambda, 0.63\lambda$. Отсюда следует, что максимальный отбор мощности от линии переменного напряжения на

участке: $0.15\lambda \leq x \leq 0.386\lambda$ возможен в режиме, близком к XX, а на участках: $0 < x \leq 0.15\lambda$ и $0.386\lambda \leq x \leq 0.63\lambda$ в режиме, близком к КЗ. Такая ситуация повторяется через каждые отрезки волновой длины линии, равные примерно $\lambda/4$.

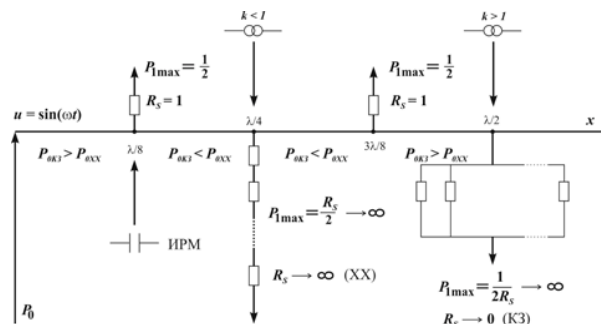


Рис.7. Особые точки длинной линии и рекомендуемые схемы включения компенсирующих устройств, трансформаторов и нагрузок к линии

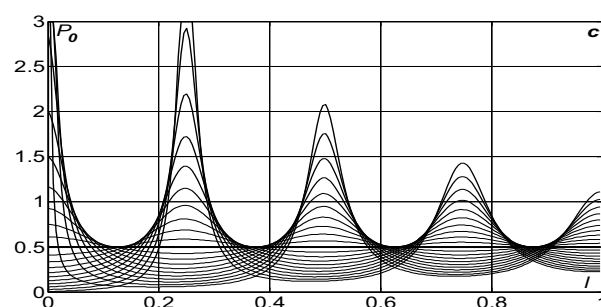


Рис.8. Характер изменения активной мощности на входе линии с потерями в функции от ее длины при согласованной нагрузке

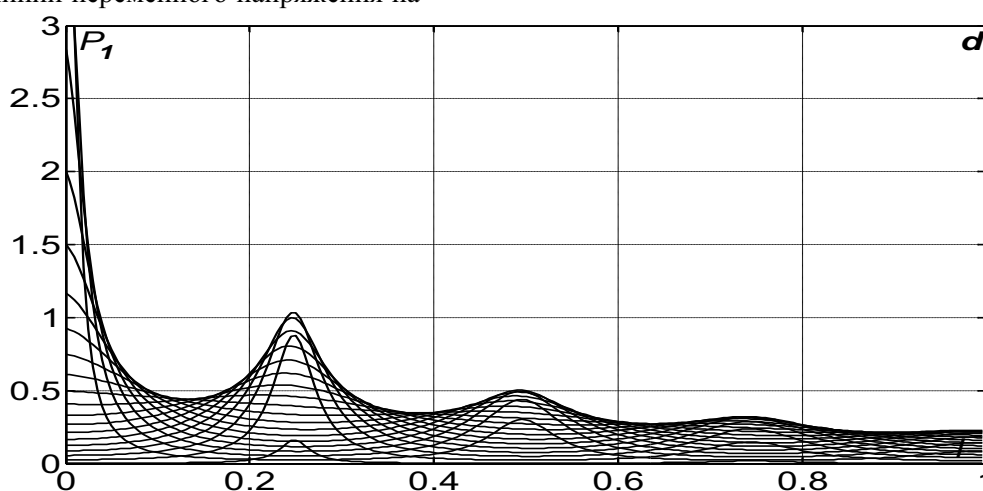


Рис.9. Характер изменения активной мощности (транзитной) на конце линии с потерями в функции от ее длины при согласованной нагрузке

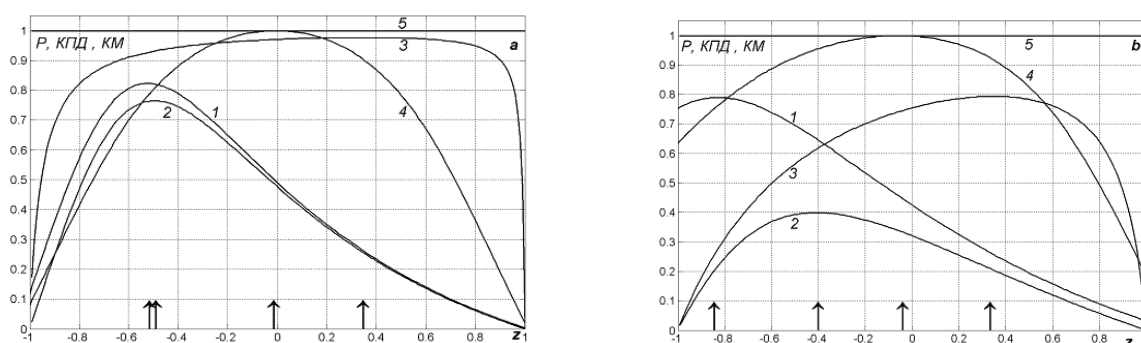


Рис. 10. Зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от сопротивления нагрузки RS при $l = 0.0516$; $R = 0.48(a)$; $4.8(b)$; $G = R/5$; $Z_S = R_S$, где 1 – $P1$; 2 – $P2$; 3 – η ; 4 – $\cos\phi1$; 5 – $\cos\phi2$

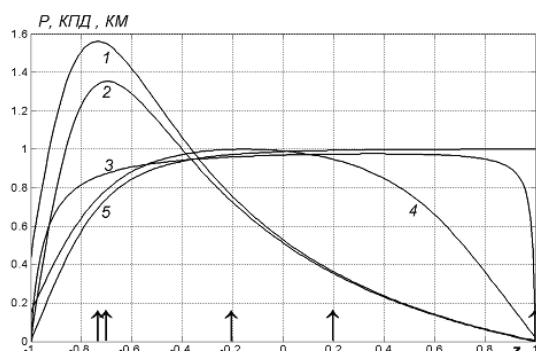


Рис. 11. Зависимость от сопротивления нагрузки RS генерируемой (1) и передаваемой мощности (2), КПД (3) и КМ источника (4) и приемника (5) при $l = 0.0516$; $R = 0.48$; $G = R/5$; $Z_S = R_S - j / (\omega C_S)$; $C_S = 1$.

На рис. 8 и 9 приведены обобщенные данные о характере изменения мощности на входе и на приемном конце линии с потерями (при различных потерях) в случае согласованной нагрузки.

Следует отметить, что хотя потери линии влияют на значение передаваемой мощности, но имеются такие точки в линии, для которых не выявляется влияние потерь линии на значение переданной в нагрузку мощности. Такие режимы возможны как в линиях относительно коротких, так и в линиях сравнимых с длиной волны.

На рис. 10 представлено изменение генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника (кривые 1-5) в зависимости от параметра z при $l = 0.0516$; $R = 0.48(a)$; $4.8(b)$; $G = R/5$; $Z_S = R_S$. Эти графики

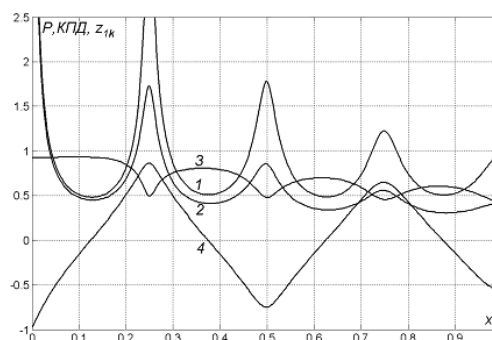


Рис. 12 Зависимость от длины линии x генерируемой (1), максимальной передаваемой (2) мощности, КПД (3) и критического сопротивления $z1k$ (4) при $R = 0.48$; $G = R/5$.

о
ций

достигаются при различных значениях сопротивления нагрузки R_S . С увеличением потерь в линии наблюдается «разбегание» критических сопротивлений для генерируемой и передаваемой мощности, тогда как точки максимума для КПД и КМ остаются практически неподвижными. Таким образом, при вариации параметра R_S для любого отрезка длины линии можно получить полное представление о перетоках мощности, что позволяет выбрать оптимальный режим линии исходя из тех или иных критериев.

Рис.11 иллюстрирует зависимость генерируемой и передаваемой мощности, КПД и КМ источника и приемника от параметра z при $Z_S = R_S - j / (\omega C_S)$; $C_S = 1$ (17.57 мкФ). Продольное активное сопротивление и активная проводимость линии в относительных единицах имеют значения: $R = 0.48$, $G = R/5$. Продольная

компенсация параметров нагрузки для этой длины линии увеличивает максимальную передаваемую мощность, но уменьшает КПД и $\cos \varphi$.

На рис.12 показана зависимость генерируемой и максимальной передаваемой мощности, КПД и критического сопротивления z_{lk} от длины линии (кривые 1–4).

Увеличению (уменьшению) передаваемой мощности по мере изменения длины линии всегда сопутствует уменьшение (увеличение) КПД. Для четвертьволновой линии максимум мощности имеет место в режиме, близком к ХХ ($R_S = 13.93 Z_B$), а для полуволновой линии в режиме, близком к КЗ ($R_S = 0.14 Z_B$).

Выводы

1. В рамках тенденции развития региональных и межрегиональных энергетических систем актуальность разработки эффективных методов исследования режимов в таких цепях многократно возрастает. Исследование влияния различных факторов, какими являются параметры линии и нагрузки, диссипация и дисперсия волн на потери мощности позволяет разработать меры по повышению эффективности функционирования ЛЭП в составе региональных энергообъединений.
2. Самым значимым влияющим параметром на режим передачи мощности по длинным линиям является ее длина.
3. Следует различать режимы работы линии при максимальной передаваемой мощности, КПД, КМ и максимальной отдаче энергии генератором синусоидального напряжения в данную линию.
4. Исследования в данном направлении имеют не только научную значимость, но и практическую, поскольку можно обосновано разрабатывать наиболее рациональные способы передачи энергии по линиям высокого напряжения и решать других задачи из области диагностики, координации изоляции, расчета потерь, как в стационарных, так и нестационарных (переходных) режимах.

Литература

1. В Португалии открылась крупнейшая в мире солнечная электростанция. <http://www.membrana.ru/lenta/index.html?7077>.
2. Аризона строит крупнейшую солнечную электростанцию на Земле. <http://www.membrana.ru/lenta/index.html?8014>.
3. Energia din Sahara va „lumina“ lumea. <http://www.ecomagazin.ro/energia-din-sahara-va-%e2%80%9elumina%e2%80%9c-lumea-2/>
4. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Планетарная электроэнергетическая система. Энергия, 2006, №9 сс. 27-34/ <http://courier.com.ru/energy/en0906kovalev.htm>.
5. Александров Г.Н., Ле Тхань Бак. Уменьшение потерь мощности в дальних линиях электропередачи с управляемыми реакторами.-Электричество, 2007, №3, СС. 8-15.
6. Вершков В.А., Нахапетян К.Т., Ольшевский О.В., Совалов С.А., Фотин В.П., Щербаков В.К. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ Европейской части СССР.- Электричество, 1968, №8, сс.10-16.
7. Зильберман С.М., Самородов Г.И. Возможные перспективы импорта электроэнергии в Республику Молдова из Тюменского региона. Труды Конференции «Энергетика Молдовы 2005», Кишинев: 2005, Типография АНМ, СС.104-110.
8. Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И., Карчева Н.Ф., Андрос И.В. Волновые явления в неоднородных линиях. Том 4. Параметрические цепи/ АН Молдовы. Ин-т энергетики. Кишинэу: TASM? 2008.-552с.
9. Римский В.К., Берзан В.П., Тыршу М.С. Волновые явления в неоднородных линиях. Т.1. Теория распространения волн потенциала и тока. Под ред. Римского В.К. – Кишинев: Типография АНМ, 1997. – 298с.
10. Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И. и др. Как увеличить передаваемую мощность в десятки раз. – Кишинев: Типография АНМ, 2007. – 178с.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи /Учебник для ВТУЗов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559с.