

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 кВ НА НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

Охременко А.Ю.

Белорусский национальный технический университет
aohrimenko@brestenergo.by

The paper gives the values of the capacities between circuits of two-circuit open-air electric power lines with the voltage of 35 kV and 35-110 kV. Changes of the capacity between circuits of an electric power line with the voltage of 35 kV have been calculated with the account of the distance between axes if the lines are parallel. The change of the displacement voltage of the neutral points voltage has been determined depending on condition of the network (if it is a network with isolated neutral, compensating network, active impedance earthed neutral network).

При эксплуатации сетей, работающих с изолированной нейтралью, имеет место случаи появления эффекта замыкания на землю и искажения симметричности фазных напряжений при замыканиях на землю в других сетях. Электростатическое влияние сетей сопровождается перенапряжениями или нарушениями симметричности трехфазных систем напряжений и нормального режима их работы.

Электростатическое влияние всех проводов одной системы на провода второй системы обращается в нуль, если все взаимные емкости равны.

Появление составляющей нулевой последовательности в одной системе, оказывает на соседнюю линию существенное влияние, которое пропорционально сумме взаимных емкостей.

На двухцепном участке или параллельно идущих линиях (рис.1), замыкание на землю влияющей цепи (I) и появления в результате напряжения смещения нейтрали будет оказывать влияние на цепь (II) через взаимную емкость между двумя линиями C_{1-2} .

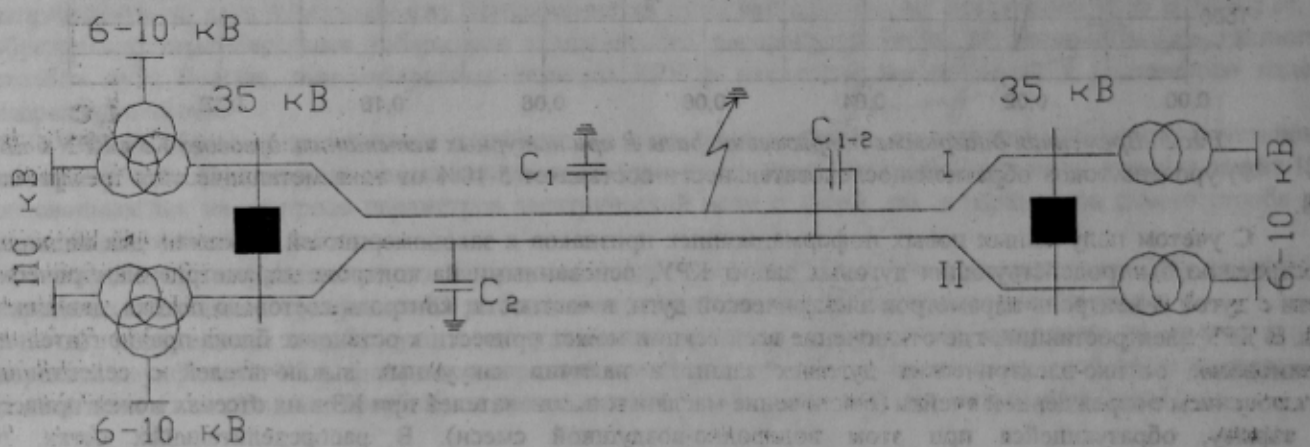


Рис.1. Схема параллельно работающих линий.

C_1, C_2 – соответственно емкости линий относительно земли I и II цепи.

Полная емкость относительно земли складывается из двух параллельно включенных емкостей. При однофазном замыкании на землю во влияющей цепи появляется составляющая нулевой последовательности, на подверженной влиянию цепи за счет емкостной связи возникает смещение нулевой точки. Абсолютные значения напряжения смещения нейтрали U_{02} для сети, с различными режимами работы нейтрали, запишется в виде: сеть с изолированной нейтралью:

$$U_{02} = U_{01} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{C}{C_{1-2}}\right)^2 + \left(\frac{3}{r\omega C_{1-2}}\right)^2}}, \quad (1)$$

где U_{01} – напряжение нулевой последовательности первой цепи; C – емкость трехфазной сети, C_{1-2} – междофазная емкость, r – сопротивление изоляции, ω – угловая частота.

сеть с компенсированной нейтралью:

$$U_{02} = U_{01} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{C}{C_{1-2}}(1-k)\right)^2 + \left(\frac{R+R_0}{RR_0\omega C_{1-2}}\right)^2}}, \quad (2)$$

где $k = \frac{1}{\omega^2 CL_p}$ - степень компенсации; L_p - индуктивность дугогасящего реактора; R_0 - активное сопротивление дугогасящего реактора; $R=r/3$.

Сеть с активным сопротивлением в нейтрали:

$$U_{02} = U_{01} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{C}{C_{1-2}}\right)^2 + \left(\frac{R_N+R}{R_N R \omega C_{1-2}}\right)^2}}, \quad (3)$$

где R_N - активное сопротивление резистора, подключенного в нейтраль трансформатора.

Для оценки напряжения смещения нейтрали в подверженной электростатическому влиянию цепи, необходимо знать численные значения межцепной емкости C_{1-2} . Однозначных данных в технической литературе о значениях межцепных емкостей не приводится. Для определения межцепных емкостей двухцепных воздушных линий без грозозащитного троса, составим систему линейных уравнений Максвелла [1]:

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha_{11}Q_1 + \alpha_{12}Q_2 + \alpha_{13}Q_3 + \alpha_{14}Q_4 + \alpha_{15}Q_5 + \alpha_{16}Q_6; \\ U_2 &= \alpha_{21}Q_1 + \alpha_{22}Q_2 + \alpha_{23}Q_3 + \alpha_{24}Q_4 + \alpha_{25}Q_5 + \alpha_{26}Q_6; \\ U_3 &= \alpha_{31}Q_1 + \alpha_{32}Q_2 + \alpha_{33}Q_3 + \alpha_{34}Q_4 + \alpha_{35}Q_5 + \alpha_{36}Q_6; \\ U_4 &= \alpha_{41}Q_1 + \alpha_{42}Q_2 + \alpha_{43}Q_3 + \alpha_{44}Q_4 + \alpha_{45}Q_5 + \alpha_{46}Q_6; \\ U_5 &= \alpha_{51}Q_1 + \alpha_{52}Q_2 + \alpha_{53}Q_3 + \alpha_{54}Q_4 + \alpha_{55}Q_5 + \alpha_{56}Q_6; \\ U_6 &= \alpha_{61}Q_1 + \alpha_{62}Q_2 + \alpha_{63}Q_3 + \alpha_{64}Q_4 + \alpha_{65}Q_5 + \alpha_{66}Q_6, \end{aligned} \quad (4)$$

где U_1, U_2, \dots, U_6 - напряжение провода; Q_1, Q_2, \dots, Q_6 - заряд на единицу длины провода, α_{ii} - собственные потенциальные коэффициенты, $\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$ - взаимные потенциальные коэффициенты, т.е. потенциал провода i , когда на проводе k имеется единичный заряд, и отсутствуют заряды на всех остальных проводах, α_{ij} - потенциальные коэффициенты между i -м проводом первой цепи и j -ым проводом другой цепи;

Собственные α_{ii} и взаимные α_{ik}, α_{ij} потенциальные коэффициенты вычисляются по формулам

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r}; \alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{S'_{ik}}{S_{ik}}; \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H'_{ij}}{H_{ij}}, \quad (5)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9}$ Ф/км - электрическая постоянная; h_{zi} - эквивалентная высота подвески i -го провода над землей, которая определяется как $h_{zi} = h_i - 2/3 f_{+15} - l_{грл}$; h_i - высота от земли до траверсы опоры; f_{+15} - стрела провеса провода при среднегодовой температуре без ветра и гололеда; $l_{грл}$ - длина гирлянды изоляторов; S_{ik} - расстояние между i -м и k -м проводами; S'_{ik} - расстояние между i -м проводом и зеркальным отображением k -го провода; D_{ij} - расстояние между i -м проводом первой цепи и j -ым проводом другой цепи; H'_{ij} - расстояние между i -м проводом первой цепи и зеркальным отражением j -го провода другой цепи; r - радиус провода.

Для воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ длина гирлянды изоляторов при количестве изоляторов, равном трем, значение $l_{грл} = 0,622$ м, шести - $l_{грл} = 1,257$ м.

Сложим уравнения для трех фаз каждой цепи с учетом, что напряжение нулевой последовательности U_{01}, U_{02} определяются из соотношения [2]

$$\begin{aligned} 3U_{01} &= (U_1 + U_2 + U_3); \\ 3U_{02} &= (U_4 + U_5 + U_6). \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (4) запишем в виде

$$\begin{aligned} 3U_{01} &= (\alpha_{11} + \alpha_{21} + \alpha_{31})Q_1 + (\alpha_{12} + \alpha_{22} + \alpha_{32})Q_2 + (\alpha_{13} + \alpha_{23} + \alpha_{33})Q_3 + \\ &+ (\alpha_{14} + \alpha_{24} + \alpha_{34})Q_4 + (\alpha_{15} + \alpha_{25} + \alpha_{35})Q_5 + (\alpha_{16} + \alpha_{26} + \alpha_{36})Q_6; \\ 3U_{02} &= (\alpha_{41} + \alpha_{51} + \alpha_{61})Q_1 + (\alpha_{42} + \alpha_{52} + \alpha_{62})Q_2 + (\alpha_{43} + \alpha_{53} + \alpha_{63})Q_3 + \\ &+ (\alpha_{44} + \alpha_{54} + \alpha_{64})Q_4 + (\alpha_{45} + \alpha_{55} + \alpha_{65})Q_5 + (\alpha_{46} + \alpha_{56} + \alpha_{66})Q_6. \end{aligned} \quad (7)$$

Предположим, что сумма зарядов цепи воздушной линии равна некоторому эквивалентному заряду, т.е.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_I; \quad (8)$$

$$Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q_{II},$$

где Q_I, Q_{II} - соответственно эквивалентные заряды для цепи I и II.

Решение уравнения (7) громоздко и занимает много времени. Линейные системы алгебраических уравнений (при любом их числе) проще всего решаются с помощью теории матриц. Матричная запись является весьма компактной, основанной на исключении излишней информации. Эта запись производится сразу для всей группы величин, обладающими какими-либо общими признаками.

Подставим (8) в (7), получим

$$\begin{pmatrix} U_{01} \\ U_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_{1-II} \\ \alpha_{II-I} & \alpha_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_I \\ Q_{II} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_I &= \frac{1}{3}(\alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33} + 2\alpha_{12} + 2\alpha_{13} + 2\alpha_{23}); \\ \alpha_{II} &= \frac{1}{3}(\alpha_{44} + \alpha_{55} + \alpha_{66} + 2\alpha_{45} + 2\alpha_{46} + 2\alpha_{56}); \\ \alpha_{I-II} &= \alpha_{II-I} = \frac{1}{3}(\alpha_{14} + \alpha_{15} + \alpha_{16} + \alpha_{24} + \alpha_{25} + \alpha_{26} + \alpha_{34} + \alpha_{35} + \alpha_{36}). \end{aligned} \quad (10)$$

Решив матрицу (9) относительно неизвестных Q, получим другую блок-матрицу вида

$$\begin{pmatrix} Q_I \\ Q_{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_I & \beta_{I-II} \\ \beta_{II-I} & \beta_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{01} \\ U_{02} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{где } \beta_I = \frac{\alpha_{II}}{\alpha_I \alpha_{II} - \alpha_{I-II}^2}; \beta_{II} = \frac{\alpha_I}{\alpha_I \alpha_{II} - \alpha_{I-II}^2}; \beta_{I-II} = \beta_{II-I} = -\frac{\alpha_{I-II}}{\alpha_I \alpha_{II} - \alpha_{I-II}^2}.$$

В том случае, когда цепи I и II выполнены одним и тем же сечением проводов, расположены на опорах симметрично, то в силу симметрии

$$\beta_I = \beta_{II} = \frac{\alpha_I}{\alpha_I^2 - \alpha_{I-II}^2}; \beta_{I-II} = \beta_{II-I} = -\frac{\alpha_{I-II}}{\alpha_I^2 - \alpha_{I-II}^2}. \quad (12)$$

Искомые значения емкостей относительно земли и межцепная емкость определяются как:

$$C_I = \beta_I + \beta_{I-II}; C_{II} = \beta_{II} + \beta_{I-II}; C_{I-II} = -\beta_{I-II}. \quad (13)$$

При наличии троса, исходное уравнение (4) несколько усложнится, так как приходится рассматривать наличие одновременно трех систем проводов – одной цепи, второй цепи и троса. Поэтому

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha_{11}Q_1 + \alpha_{12}Q_2 + \alpha_{13}Q_3 + \alpha_{14}Q_4 + \alpha_{15}Q_5 + \alpha_{16}Q_6 + \alpha_{1T}Q_T; \\ U_2 &= \alpha_{21}Q_1 + \alpha_{22}Q_2 + \alpha_{23}Q_3 + \alpha_{24}Q_4 + \alpha_{25}Q_5 + \alpha_{26}Q_6 + \alpha_{2T}Q_T; \\ U_3 &= \alpha_{31}Q_1 + \alpha_{32}Q_2 + \alpha_{33}Q_3 + \alpha_{34}Q_4 + \alpha_{35}Q_5 + \alpha_{36}Q_6 + \alpha_{3T}Q_T; \\ U_4 &= \alpha_{41}Q_1 + \alpha_{42}Q_2 + \alpha_{43}Q_3 + \alpha_{44}Q_4 + \alpha_{45}Q_5 + \alpha_{46}Q_6 + \alpha_{4T}Q_T; \\ U_5 &= \alpha_{51}Q_1 + \alpha_{52}Q_2 + \alpha_{53}Q_3 + \alpha_{54}Q_4 + \alpha_{55}Q_5 + \alpha_{56}Q_6 + \alpha_{5T}Q_T; \\ U_6 &= \alpha_{61}Q_1 + \alpha_{62}Q_2 + \alpha_{63}Q_3 + \alpha_{64}Q_4 + \alpha_{65}Q_5 + \alpha_{66}Q_6 + \alpha_{6T}Q_T; \\ 0 &= \alpha_{1T}Q_1 + \alpha_{2T}Q_2 + \alpha_{3T}Q_3 + \alpha_{4T}Q_4 + \alpha_{5T}Q_5 + \alpha_{6T}Q_6 + \alpha_{TT}Q_T. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\alpha_{TT} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_T}{r_T}; \alpha_{iT} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{S_{iT}}{S_{iT}}, \quad (15)$$

где α_k для проводов вычисляются по формуле (5); h_T – эквивалентная высота подвески троса над землей, которая определяется как $h_T = h_j - 2/3f_{+15} - h_{арм}$; h_j – высота от земли до места крепления арматуры на тросостойке опоры; f_{+15} – стрела провеса троса при среднегодовой температуре без ветра и гололеда; $h_{арм}$ – длина арматуры, предназначенная для крепления троса (состоит из узла крепления и глухого зажима); S_{iT} – расстояние между i-м проводом и тросом; S'_{iT} – расстояние между i-м проводом и зеркальным отображением троса; r_T – радиус троса.

Заземленный грозозащитный трос влияет на значение емкостных проводимостей линии. Тогда система уравнений (14) запишется блок-матрицей как

$$\begin{pmatrix} U_{01} \\ U_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha'_I & \alpha'_{I-II} \\ \alpha'_{II-I} & \alpha'_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_I \\ Q_{II} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где

$$\alpha'_{I} = \frac{1}{3}(\alpha_{I} - \alpha_{IT}); \alpha'_{II} = \frac{1}{3}(\alpha_{II} - \alpha_{IIT}); \alpha'_{I-II} = \frac{1}{3}(\alpha_{I-II} - \alpha_{IT}); \alpha'_{II-I} = \frac{1}{3}(\alpha_{II-I} - \alpha_{IT})$$

$$\alpha_{IT} = \frac{(\alpha_{1T} + \alpha_{2T} + \alpha_{3T})^2}{\alpha_{TT}}; \alpha_{IIT} = \frac{(\alpha_{4T} + \alpha_{5T} + \alpha_{6T})^2}{\alpha_{TT}}$$

Далее, производится определение численных значений всех элементов потенциальных коэффициентов блок-матрицы (16), а затем вычисляются собственные и взаимные емкостные коэффициенты по выражениям (11) и в соответствии с формулой (13) - значения емкостей проводов относительно земли и межцепные емкости.

Значения фазных емкостей относительно земли и междуфазных емкостей на единицу длины, определенные по выражению (11) и (13) в зависимости от типа и геометрических размеров опор, для двухцепных воздушных линий напряжением 35 кВ и 35-110 кВ приведены, соответственно, в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1
Емкость относительно земли и межцепная емкость двухцепных воздушных линий напряжением 35 кВ

Тип опоры	Емкости цепи относительно земли и межцепная емкость, пФ/км, сечением						
	Емкость цепи и межцепная емкость	АС-95		АС-120		АС-150	
		без троса	с тросом	без троса	с тросом	без троса	с тросом
ПБ 35-2	$C_I = C_{II}$	3,423	3,794	3,399	3,778	3,450	3,840
	C_{I-II}	2,107	1,922	2,207	2,017	2,317	2,122

Примечание: 1. Длины пролетов равны 230, 255, 255 м соответственно для проводов марок АС-95, АС-120, АС-150. 2. Стрелы провеса определены для II района по гололеду.

Таблица 2
Емкость относительно земли и межцепная емкость двухцепных воздушных линий напряжением 110 кВ (левая цепь) и напряжением 35 кВ (правая цепь)

Тип опоры	Емкости цепи относительно земли и межцепная емкость, пФ/км, сечением							
	Емкость цепи и межцепная емкость		АС-120		АС-70		АС-120	
	левая цепь	правая цепь	левая цепь	правая цепь	левая цепь	правая цепь	левая цепь	правая цепь
ПБ 35-2	C_I	C_{II}	4,099	3,870	4,079	3,937	4,142	4,057
	C_{I-II}		1,716		1,746		1,734	

Примечание: 1. Длины пролетов равны 215, 235, 250 м соответственно для проводов марок АС-120-АС-70, АС-120-АС-95, АС-120-АС-120. 2. Стрелы провеса определены для II района по гололеду.

Из данных табл.1 и табл.2 видно, что емкости проводов одной цепи двухцепной линии меньше примерно на 33-36 % по сравнению с емкостями проводов одноцепной линии. Подвеска на линии напряжением 35 кВ заземленного грозозащитного троса приводит к увеличению емкости проводов примерно на 10 %. Значение межцепной емкости двухцепных воздушных линий напряжением 35 кВ составляют 0,64 и 0,53 от емкости линии относительно земли, соответственно, для линий без грозозащитных тросов и с ними.

Среднее значение межцепной емкости двухцепных воздушных линий составляет 1,732 пФ/км, при условии подвески на опорах цепей различного номинального напряжения (35 и 110 кВ).

Установлено, что при минимально допустимом расстоянии между крайними проводами, параллельно проложенных воздушных линий 35 кВ, равном 4м [3], межцепная емкость составляет 0,64 от емкости линии относительно земли; при расстоянии 16 м - 0,12; 30 м - 0,04.

Отметим, что полученные данные по значению емкостей относительно земли двухцепных воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ не учитывают влияние емкости изоляции.

Произведя расчеты по выражениям (1)-(3) можно сделать следующие выводы: напряжение смещения нейтрали в неповрежденной сети с изолированной нейтралью составляет приблизительно 0,38U_ф. В сети с компенсированной нейтралью при резонансной настройке дугогасящего реактора (κ=1) напряжение смещения составляет 0,99U_ф, при 5% перекомпенсации (κ=1,05) - 1,07U_ф, недокомпенсации (κ=0,95) - 0,92U_ф. При подключении резистора напряжения смещения нейтрали в неповрежденной сети не наблюдается.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. Расчет электрической емкости - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 240 с
- 2 Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М.: «Энергия», 1970 - 520 с.
- 3 Правила устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 648 с.

Рекомендовано д.т.н. проф. Карасьом С.В.