

МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ИЗОЛАЦИЯТА НА ТРИФАЗНИТЕ МРЕЖИ ДО 1000 V С ИЗОЛИРАН ЗВЕЗДЕН ЦЕНТЪР НА ТРАНСФОРМАТОРА

Стефан Стефанов

Минно-геоложки университет
 "Св.Иван Рилски"
 София 1700, България

Иван Милев

Минно-геоложки университет
 "Св.Иван Рилски"
 София 1700, България

Ангел Зъбчев

Минно-геоложки университет
 "Св.Иван Рилски"
 София 1700, България

РЕЗЮМЕ

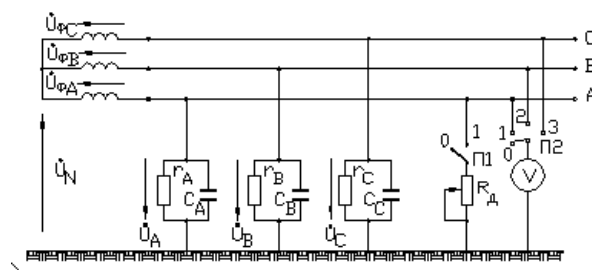
Предлага се метод за определяне на параметрите на изолацията чрез включване на допълнителна проводимост към една от фазите и измерване на напреженията на другите две фази. Предимство на метода е, че е лесно осъществим и се основава на измерването само на напрежения, при което се постига необходимата точност и безопасност в процеса на измерване.

За осигуряване на необходимите условия за електро-безопасност в мрежите за напрежение до 1000 V с изолиран звезден център на трансформатора от особена важност е да се знаят параметрите на изолацията на тези мрежи спрямо земя. За определянето на тези параметри съществуват различни методи. Един от най-използваните е този на празен ход и късо съединение (Сычев и др., 1979). Като недостатък тук може да се посочи, че е необходимо измерването на ток на късо съединение към земя, което влошава условията за електробезопасност в процеса на измерване. Друг метод е с използване на фазочувствителни уреди (Цапенко, 1972). Негов недостатък е, че освен големината на тока на земно съединение е необходимо измерването на фазата на тока. Това усложнява процеса на измерване и понижава точността. Съществува и графоаналитичен метод (Сычев и др., 1979). Недостатък на този метод е, че е необходимо измерването на шест напрежения и значителна по обем изчислителна работа.

В настоящия доклад се предлага метод за определяне на параметрите на изолацията чрез включване на допълнителна проводимост към една от фазите и измерване само на напреженията на другите две фази. Предимство на метода е, че е лесно осъществим и се основава на измерването само на напрежения, при което се постига необходимата точност и безопасност в процеса на измерването. Методът се пояснява и реализира съгласно схемата, показана на фиг. 1, където:

$U_{\text{фА}}, U_{\text{фВ}}$ и $U_{\text{фС}}$ са комплексните фазови напрежения на източника, образуващи симетрична трифазна система;
 $U_{\text{А}}, U_{\text{В}}, U_{\text{С}}$ – комплексните напрежения на отделните фази на мрежата спрямо земя;
 U_{N} - комплексното напрежение на сместване на неутралата;

$\Gamma_{\text{А}}, \Gamma_{\text{В}}, \Gamma_{\text{С}}$ - активни съпротивления на изолацията между фазите и земя;
 $C_{\text{А}}, C_{\text{В}}, C_{\text{С}}$ - капацитет на проводниците спрямо земя;
 $R_{\text{д}}$ - допълнително съпротивление, което се включва при измерването.



Фигура 1.

Всяко състояние на такава мрежа при зададени посоки на векторите на напреженията може да се отрази на диаграмата от фиг. 2.



Фигура 2.

За определяне на координатите на т. N (x, y) първоначално е необходимо да се намерят аналитични изрази за определяне на напреженията $U_{\text{А}}, U_{\text{В}}, U_{\text{С}}$ по показанията на волтметъра.

За тази цел се съставят уравнения на окръжности с центрове т. А, В, С и радиуси U_A, U_B, U_C .

Координатите на точките А, В и С са:

$$A\left(\frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}}, 0\right), B\left(-\frac{U_{\phi}}{2\sqrt{3}}, -\frac{U_{\phi}}{2}\right) \text{ и } C\left(-\frac{U_{\phi}}{2\sqrt{3}}, \frac{U_{\phi}}{2}\right)$$

Уравнението на окръжност с радиус R има вида:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2.$$

Следователно

$$\left(x - \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}}\right)^2 + y^2 = U_A^2;$$

$$\left(x + \frac{U_{\phi}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(y + \frac{U_{\phi}}{2}\right)^2 = U_B^2;$$

$$\left(x + \frac{U_{\phi}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(y - \frac{U_{\phi}}{2}\right)^2 = U_C^2.$$

След повдигане в квадрат се получава:

$$x^2 + y^2 - \frac{2U_{\phi}}{\sqrt{3}}x + \frac{U_{\phi}^2}{3} = U_A^2; \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 + \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}}x + U_{\phi}y + \frac{U_{\phi}^2}{3} = U_B^2; \quad (2)$$

$$x^2 + y^2 + \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}}x - U_{\phi}y + \frac{U_{\phi}^2}{3} = U_C^2. \quad (3)$$

Координатите на U_N се определят от уравненията на окръжностите в т.В с радиус U_B и в т. С с радиус U_C . От уравненията (2) и (3) се получава:

$$x^2 + y^2 + U_{\phi}x + U_{\phi}y + U_{\phi}^2 = U_B^2 \quad (4)$$

$$x^2 + y^2 + U_{\phi}x + U_{\phi}y + U_{\phi}^2 = U_C^2 \quad (5)$$

След преработка на уравнение (4) и (5) се получава:

$$y = \frac{U_B^2 - U_C^2}{2U_{\phi}} = \frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}, \quad (6)$$

$$x = \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} - \frac{U_{\phi}}{2}, \quad (7)$$

където U_{ϕ} е фазовото напрежение.

Тогава

$$U_N = \left[\sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} - \frac{U_{\phi}}{2} \right] + j\left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right). \quad (8)$$

Знаейки, че

$$U_A = U_{\phi A} - U_N = U_{\phi} - U_N,$$

$$U_B = a^2 \cdot U_A = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)U_{\phi} - U_N, \quad (9)$$

$$U_C = aU_A = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)U_{\phi} - U_N$$

$$\text{И полагайки } U_i = a_i + jd_i, \quad (10)$$

където $i = A, B, C$ се получава:

$$U_A = \frac{3}{2}U_{\phi} - \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} + j\left(\frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right), \quad (11)$$

$$U_B = \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} + j\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi} + \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right), \quad (12)$$

$$U_C = \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi} + \frac{U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right) \quad (13)$$

В изразите (11), (12) и (13) се полага:

$$\left. \begin{aligned} a_A &= \frac{3}{2}U_{\phi} - \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2}; \\ d_A &= \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} a_B &= -\sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2}; \\ d_B &= \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} a_C &= -\sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2}; \\ d_C &= \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Като се използва уравнението на окръжност с център в точка А и с радиус U_A , се получава:

$$(x - U_A)^2 + y^2 = U_A^2. \quad (17)$$

С отчитане на (6) и (7) се намира :

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{2}\left[U_B^2 + U_C^2 + 3U_{\phi}^2 - \sqrt{9U_{\phi}^2(2U_B^2 + 2U_C^2 - 3U_{\phi}^2) - 3(U_B^2 - U_C^2)^2}\right]} \quad (18)$$

От израз (18) се вижда, че е достатъчно измерването само на двете напрежения U_B и U_C , тъй като напрежението може да се получи по аналитичен път.

Важно е да се отбележи, че системата уравнения за окръжностите има две решения, симетрични спрямо правата ВС, съединяваща центровете на тези окръжности.

Показаните изчисления се отнасят за решение, намиращо се отдалечено на правата ВС.

Електрическата верига на фиг. 1 може да се опише с две комплексни независими уравнения в съответствие с първия закон на Кирхоф:

$$U_A \cdot Y_A + U_B \cdot Y_B + U_C \cdot Y_C = 0$$

$$U_A \dot{Y}_A + U_B \dot{Y}_B + U_C \dot{Y}_C = -U_A \dot{Y}_d \quad (19)$$

Първото уравнение от системата (19) отразява изходното състояние на веригата (превключвателят П₁ е в положение 0), а второто се отнася за момента, когато към една от фазите (фаза А) е включено допълнително съпротивление г_d (превключвателят П₁ е в положение 1).

Системата комплексни уравнения (19) се преобразува в система алгебрични уравнения с отчитане на (10), както следва:

$$\left. \begin{aligned} (a_A + jd_A)Y_A + (a_B + jd_B)Y_B + (a_C + jd_C)Y_C &= 0; \\ (a'_A + jd'_A)Y_A + (a'_B + jd'_B)Y_B + (a'_C + jd'_C)Y_C &= -(a'_A + jd'_A) \frac{1}{r_d} \end{aligned} \right\}$$

Като се вземе под внимание, че $Y_A = g_A + jb_A$, $Y_B = g_B + jb_B$ и $Y_C = g_C + jb_C$, се получава:

$$\left. \begin{aligned} a_A g_A + a_B g_B + a_C g_C - d_A b_A - d_B b_B - d_C b_C &= 0; \\ d_A g_A + d_B g_B + d_C g_C + a_A b_A + a_B b_B + a_C b_C &= 0; \\ a'_A g_A + a'_B g_B + a'_C g_C - d'_A b_A - d'_B b_B - d'_C b_C &= -\frac{a'_A}{r_d} \\ d'_A g_A + d'_B g_B + d'_C g_C + a'_A b_A + a'_B b_B + a'_C b_C &= -\frac{d'_A}{r_d} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Известно е, че за мрежите с напрежение до 1000V е характерна незначителна несиметрия на капацитивната проводимост на изолацията на фазите спрямо земя. Затова практически се счита, че $C_A = C_B = C_C$. В същото време несиметричната на активните проводимости на изолацията на фазите спрямо земя е изразена рязко и може да се колебае в широки граници.

За посочените условия, системата уравнения (20) приема вида:

$$\left. \begin{aligned} a_A g_A + a_B g_B + a_C g_C - (d_A + d_B + d_C)b &= 0; \\ d_A g_A + d_B g_B + d_C g_C + (a_A + a_B + a_C)b &= 0; \\ a'_A g_A + a'_B g_B + a'_C g_C - (d'_A + d'_B + d'_C)b &= -\frac{a'_A}{r_d} \\ d'_A g_A + d'_B g_B + d'_C g_C + (a'_A + a'_B + a'_C)b &= -\frac{d'_A}{r_d} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

От системата уравнения (21) се намират:

$$r_A = 1/g_A, \quad r_B = 1/g_B, \quad r_C = 1/g_C \quad \text{и} \quad C = b/\omega \quad (22)$$

По такъв начин параметрите на изолацията могат да се определят посредством измерване с волтметър на напреженията U_B, U_C, U'_B и U'_C , които се въвеждат като коефициенти в специално създадена програма за програмируем калкулятор.

Към доклада могат да се направят следните изводи:

1. Предлага се метод за определяне на параметрите на изолацията на мрежите до 1000V с изолиран звезден център чрез измерване само на четири напрежения.
2. Предлаганият метод не изисква измерване на ток на директно земно съединение, с което се осигуряват необходимите условия на електробезопасност в процеса на измерване.
3. Като бъдеща задача може да се посочи изследването на точността на метода в зависимост от промяната на линейното напрежение, големината на допълнителното съпротивление и съпротивлението на волтметъра.

ЛИТЕРАТУРА

- Сычев Л.И., Е.Ф. Цапенко. 1979. Шахтные гибкие кабели и электробезопасность сетей. М, "Недра".
Цапенко Е.Ф. 1972. Контроль изоляции в сетях до 1000 V, М."Энергия".

A METHOD FOR DETERMINING THE INSULATION PARAMETERS OF THREE-PHASE NETWORKS WITH VOLTAGE UP TO 1000 V WITH INSULATED STAR CENTRE OF THE TRANSFORMATOR

Stefan Stefanov

Ivan Milev

Angel Zabchev

University of Mining
and Geology

“St. Ivan Rilski”

Sofia 1700, Bulgaria

University of Mining and Geology

“St. Ivan Rilski”

Sofia 1700, Bulgaria

University of Mining and

Geology

“St. Ivan Rilski”

Sofia 1700, Bulgaria

ABSTRACT

A method is proposed for determining the insulation parameters by connecting an additional conductance to one of the phases and measuring the voltage of the other two phases. The method proposed has the following advantages: it is easily realizable, and it is based only on the voltage measurement, whereas the necessary accuracy and safety of the measuring are achieved.

In order to ensure the necessary electrical safety conditions, it is very important to know the insulation parameters (with respect to the ground) of networks for voltage up to 1000 V, with insulated star centre of the transformer. Different methods are known for these parameters determination. Measurement of running-light current and short-circuit current is the most often used method (Sichev, Zapenko 1979). The necessity to measure short-circuit current that aggravates the electrical safety during the measurement can be outlined as disadvantage of this method. Use of phase-sensitive equipment represents other measuring method (Zapenko, 1972) Disadvantage of this method is the necessity to measure the current phase in addition to the measurement of the current size. This complicates the measurement process and decreases its

accuracy. A graphical-analytical method exists also (Sichev ,Zapenko, 1979). Its disadvantage is the necessity to carry out heavy calculations.

A method is proposed here for determining the insulation parameters by connecting an additional conductance to one of the phases and measuring the voltage of the other two phases. The method proposed has the following advantages: it is easily realizable, and it is based only on the voltage measurement, whereas the necessary accuracy and safety of the measuring are achieved. The method is elucidated and realized by the scheme shown in Fig. 1, where: $U_{\phi A}$, $U_{\phi B}$, $U_{\phi C}$ are the complex phase voltages of the source and these voltages form asymmetric three-phase system; U_A , U_B , U_C – complex voltages (with respect to the ground) of the

individual phases of the network; U_N - complex biased voltage of the grounded neutral;

r_A, r_B, r_C – active insulation resistance between the ground and phases;

C_A, C_B, C_C – conductors capacity (with respect to the ground);

R_D – additional resistance that is connected during the measurements.

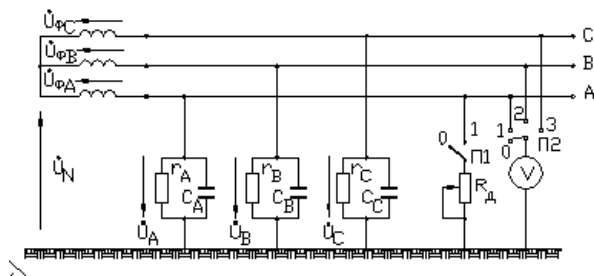


Figure 1

A diagram shown in Fig. 2 can represent each state of the network described above, at predetermined directions of the voltage vectors. In order to determine the coordinates (x, y) of the point N it is necessary at first to find the analytical expression for determining U_A, U_B and U_C voltages using the data read in the voltmeter. To solve the task, equations are worked out for circumferences with centers in points A, B and C and radiuses U_A, U_B and U_C .

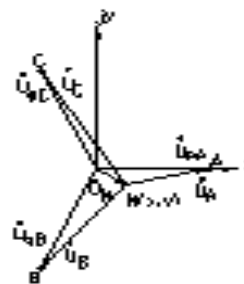


Figure 2

To solve the task, equations are worked out for circumferences with centers in points A, B and C and radiuses U_A, U_B and U_C .

Coordinates of points A, B and C are determined in the following way:

$$A\left(\frac{U_{\Pi}}{\sqrt{3}}, 0\right), B\left(-\frac{U_{\Pi}}{2\sqrt{3}}, -\frac{U_{\Pi}}{2}\right) \text{ и } C\left(-\frac{U_{\Pi}}{2\sqrt{3}}, \frac{U_{\Pi}}{2}\right)$$

The equation of a circumference with a radius R is represented in the following way:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2.$$

Consequently:

$$\left(x - \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{3}}\right)^2 + y^2 = U_A^2;$$

$$\left(x + \frac{U_{\Pi}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(y + \frac{U_{\Pi}}{2}\right)^2 = U_B^2;$$

$$\left(x + \frac{U_{\Pi}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(y - \frac{U_{\Pi}}{2}\right)^2 = U_C^2.$$

After finding the quadrate, it is obtained:

$$x^2 + y^2 - \frac{2U_{\pi}}{\sqrt{3}} \cdot x + \frac{U_{\pi}^2}{3} = U_{\pi}^2;$$

(1)

$$x^2 + y^2 + \frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}} \cdot x + U_{\pi} \cdot y + \frac{U_{\pi}^2}{3} = U_B^2;$$

(2)

$$x^2 + y^2 + \frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}} \cdot x - U_{\pi} \cdot y + \frac{U_{\pi}^2}{3} = U_C^2.$$

(3)

Coordinates of U_N are determined using the equations of circumferences with a center in point B and radius U_B and with a center in point C and radius U_C . Using equation (2) and (3), it is obtained:

$$x^2 + y^2 + U_{\phi} \cdot x + U_{\pi} \cdot y + U_{\phi}^2 = U_B^2$$

(4)

$$x^2 + y^2 + U_{\phi} \cdot x + U_{\pi} \cdot y + U_{\phi}^2 = U_C^2$$

(5)

After processing equation (4) and (5), it is obtained:

$$y = \frac{U_B^2 - U_C^2}{2U_{\pi}} = \frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3} \cdot U_{\phi}},$$

(6)

$$x = \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3} \cdot U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\phi}\right)^2} - \frac{U_{\phi}}{2},$$

(7)

where U_{ϕ} is the phase voltage.

Then:

$$U_N = \left[\sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} - \frac{U_{\phi}}{2} \right] + j\left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right).$$

(8)

Knowing that:

$$U_A = U_{\phi A} - U_N = U_{\phi} - U_N,$$

$$U_B = a^2 \cdot U_A = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot U_{\phi} - U_N,$$

(9)

$$U_C = aU_A = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot U_{\phi} - U_N$$

and laying out

$$U_i = a_i + jd_i,$$

(10)

where $i = A, B, C$, it is obtained:

$$U_A = \frac{3}{2}U_{\phi} - \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} + j\left(\frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right),$$

(11)

$$U_B = \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} + j\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi} + \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right),$$

(12)

$$U_C = \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi}\right)^2} + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}U_{\phi} + \frac{U_C^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}\right)$$

(13)

It is laid out in equations (11), (12), and (13)

$$\left. \begin{aligned} a_A &= \frac{3}{2}U_\phi - \sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_\phi} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi\right)^2}; \\ d_A &= \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_\phi}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} a_B &= -\sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_\phi} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi\right)^2}; \\ d_B &= \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_\phi} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} a_C &= -\sqrt{U_C^2 - \left(\frac{U_B^2 - U_C^2}{2\sqrt{3}U_\phi} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi\right)^2}; \\ d_C &= \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_\phi} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

By use of the equation of a circumference with center in point A and radius U_A , it is obtained:

$$(x - U_A)^2 + y^2 = U_A^2. \quad (17)$$

Taking into consideration (6) and (7), it is found:

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{2} \left[U_B^2 + U_C^2 + 3U_\phi^2 - \sqrt{9U_\phi^2(2U_B^2 + 2U_C^2 - 3U_\phi^2) - 3(U_B^2 - U_C^2)^2} \right]} \quad (18)$$

As it can be seen from equation (18), the measurement of only two voltages U_B and U_C is enough, because the U_A voltage can be found analytically.

It is important to note that the system of equations describing the circumferences has two solutions symmetric with respect to the straight line connecting centers of those circumferences. Calculations presented are for solution situated to the right of the line BC.

The electric circuit shown in Fig. 1 can be described by two complex independent equations, in conformity with the first law of Kirchhoff.

$$U_A \cdot Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C = 0$$

$$U_A' Y_A + U_B' Y_B + U_C' Y_C = -U_A' Y_d \quad (19)$$

The first equation of the system (19) reflects the initial state of the circuit (the switch П1 is in position 0). The second equation reflects the state when to one of the phases (phase A) is connected and additional resistance r_d (the switch П1 is in position 1).

The system (19) of complex equations is transformed into a system of algebraic equations, while equation (10) is taken into account, as it follows:

$$\left. \begin{aligned} (a_A + jd_A)Y_A + (a_B + jd_B)Y_B + (a_C + jd_C)Y_C &= 0; \\ (a_A' + jd_A')Y_A + (a_B' + jd_B')Y_B + (a_C' + jd_C')Y_C &= -(a_A' + jd_A')\frac{1}{r_d}. \end{aligned} \right\}$$

Taking into consideration that:

$$r_A = 1/g_A, \quad r_B = 1/g_B, \quad r_C = 1/g_C \quad \text{и} \quad C = b/\omega \quad (22)$$

$$Y_A = g_A + jb_A, \quad Y_B = g_B + jb_B \quad \text{и} \quad Y_C = g_C + jb_C,$$

it is obtained:

$$\left. \begin{aligned} a_A g_A + a_B g_B + a_C g_C - d_A b_A - d_B b_B - d_C b_C &= 0; \\ d_A g_A + d_B g_B + d_C g_C + a_A b_A + a_B b_B + a_C b_C &= 0; \\ a'_A g_A + a'_B g_B + a'_C g_C - d'_A b_A - d'_B b_B - d'_C b_C &= -\frac{a'_A}{r_0} \\ d'_A g_A + d'_B g_B + d'_C g_C + a'_A b_A + a'_B b_B + a'_C b_C &= -\frac{d'_A}{r_0} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

It is known that the network with a voltage up to 1000V is characterized with insignificant asymmetry of the capacitive conductance of the phase insulation with respect to the ground. That is why it is considered in practice that $C_A=C_B=C_C$. At the same time, the asymmetry of the active conductance of the phase insulation with respect to the ground is well pronounced and can vary in broad range.

For the conditions pointed out, the system (20) of equations can be represented in the following form:

$$\left. \begin{aligned} a_A g_A + a_B g_B + a_C g_C - (d_A + d_B + d_C)b &= 0; \\ d_A g_A + d_B g_B + d_C g_C + (a_A + a_B + a_C)b &= 0; \\ a'_A g_A + a'_B g_B + a'_C g_C - (d'_A + d'_B + d'_C)b &= -\frac{a'_A}{r_0} \\ d'_A g_A + d'_B g_B + d'_C g_C + (a'_A + a'_B + a'_C)b &= -\frac{d'_A}{r_0} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

From the system (21) of equations it can be found:

In this way, the insulation parameters can be determined by measuring with a voltmeter the voltages U_B, U_C, U'_B и U'_C . These voltages are introduced as coefficients in specially created program for a calculator able to be programmed.

Having in mind the above mentioned, the following conclusions could be drawn:

1. A method is proposed for determining the insulation parameters by connecting an additional conductance to one of the phases and measuring only four voltages.
2. The method proposed does not require a measurement of the current of directly grounded connection. This ensures electrical safety conditions of measurement.
3. Investigation of the accuracy of the method proposed in dependence of the change of the linear voltage, size of the additional resistance connected, and of the voltmeter internal resistance can be pointed out as future task.

REFERENCES

- Sichev L.I., E.F.Zapenko. 1979. Flexible cables for mines and electrical safety of networks, M."Nedra".
- Zapenko E.F.1972. Control of insulation in networks up to 1000 V, M."Energia".

Recommended for publication by Department
of Electrical Engineering, Faculty of Mining Electromechanics