

## ЗАМЕСТВАЩА СХЕМА НА ТРИФАЗНА МРЕЖА С ИЗОЛИРАНА НЕУТРАЛА ПРИ ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ТОКА, ПРОТИЧАЩ ПРЕЗ ТЯЛОТО НА ЧОВЕКА, ПРИ ДОКОСВАНЕ ДО ЕДНА ОТ ФАЗИТЕ ПРИ ГОЛЕМИ СТОЙНОСТИ НА ПРОВОДИМОСТТА НА ИЗОЛАЦИЯТА

Стефан Стефанов, Иван Проданов

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

**РЕЗЮМЕ.** В доклада се предлага еквивалентна схема, чрез която се разглежда зависимостта на тока през човешкото тяло от съпротивлението на изолацията на тази фаза, към която е станало докосването. Изведен е израз, позволяващ да се определя токът през човешкото тяло при докосване към трифазна мрежа с изолиран звезден център, при произволни стойности на активното съпротивление на изолацията и капацитета на мрежата.

### EQUIVALENT SCHEME OF A THREE-PHASE CIRCUIT WITH AN INSOLATED NEUTRAL, WHEN CALCULATING THE CURRENT FLOWING THROUGH THE HUMAN BODY AT THE TOUCH OF ONE OF THE PHASES, AT LARGE CONDUCTIVITY RATES OF THE INSULATION

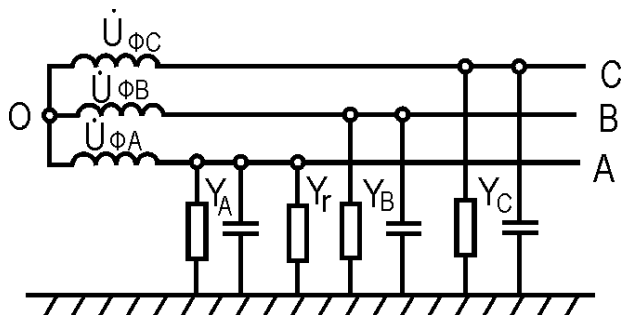
Stefan Stefanov, Ivan Prodanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

**ABSTRACT.** This report presents an equivalent scheme, with which it examines the correlation between the current that runs through the human body from the resistance of the insulation of this phase towards which the touch has occurred. An equation is derived, allowing for current to be determined when running through the human body at the touch towards a three-phase circuit with an insulated star center, at random values of the active insulation resistance and capacity of the network.

### Въведение

В редица източници [1-5] е изведена зависимост на тока, протичащ през човешкото тяло при еднофазно докосване към трифазна мрежа с изолиран звезден център, използвайки заместващата схема, показана на фиг. 1.



Фиг. 1.

Отличавайки се с няколко частни моменти, изчисленията в [1-5] се базират на еднакви изходни данни и дават тъждествени зависимости и изводи. Изведените по тази схема аналитични зависимости имат следния вид:

- в общия случай, при неравни проводимости на изолацията на фазите спрямо земя ( $Y_A \neq Y_B \neq Y_C$ ):

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| U_{\Phi} \cdot \frac{Y_B \cdot (1 - a^2) + Y_C \cdot (1 - a)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_r} \right|, \quad (1)$$

където  $Y_A, Y_B, Y_C$  са проводимостите на изолацията на фазите спрямо земя;  $Y_r$  - проводимостта на човешкото тяло;  $U_{\Phi}$  - фазовото напрежение;  $a$  - фазовият

$$\text{оператор; } a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2};$$

- при равни проводимости на изолацията на фазите спрямо земя ( $Y_A = Y_B = Y_C = Y$ ):

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| U_{\Phi} \cdot Y_r \cdot \frac{Y \cdot \left(1 + \frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + Y \cdot \left(1 + \frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{Y + Y + Y + Y_r} \right| =$$

$$= \left| U_{\Phi} \cdot Y_r \cdot \frac{3Y}{3Y + Y_r} \right|, \quad (2)$$

В заместващата схема и получените от нея зависимости се отчитат следните параметри на трифазната мрежа: проводимостта на изолацията на фазовите проводници спрямо земя, напрежението на трифазния захранващ източник, честотата.

Вътрешното съпротивление на захранващия източник и съпротивлението на фазовите проводници в заместващата схема и изчисленията не се отчитат. Изразите (1) и (2) при големи стойности на проводимостите на фазите спрямо земя са неточни поради неадекватността на заместване на реалната електрическа схема. Тяхното използване при изчисленията води до изкривяване на зависимостта на тока през човешкото тяло като функция на проводимостите на фазовите проводници и до голяма неточност.

Както следва от израз (2), зависимостта на тока  $I_r = f(Y)$  има физически смисъл в интервала  $0 < Y < \infty$  и е ограничена монотонно нарастваща функция.

Разглеждаме граничните случаи:

-а.  $|Y| \rightarrow 0$ , тогава:

$$\lim_{|Y| \rightarrow 0} \left| \dot{I}_r \right| = \lim_{|Y| \rightarrow 0} \left| U_\Phi \cdot Y_r \cdot \frac{3 \cdot Y}{3 \cdot Y + Y_r} \right| = 0, \quad (3)$$

-б.  $|Y| \rightarrow \infty$ , тогава:

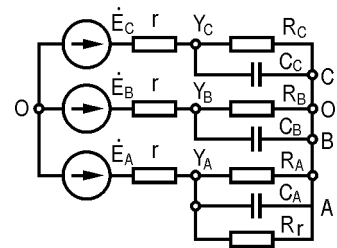
$$\begin{aligned} \lim_{|Y| \rightarrow \infty} \left| \dot{I}_r \right| &= \lim_{|Y| \rightarrow \infty} \left| U_\Phi \cdot Y_r \cdot \frac{3 \cdot Y}{3 \cdot Y + Y_r} \right| = \left| U_\Phi \right| \cdot Y_r = \\ &= \max_{|Y| \in (0, \infty)} \left| \dot{I}_r(Y) \right|. \end{aligned} \quad (4)$$

В действителност при  $|Y| \rightarrow \infty$  става късо съединение на източника на трифазното напрежение и пълно шунтиране на съпротивлението на човешкото тяло от проводимостта на изолацията, т.е.  $\left| \dot{I}_r \right| = 0$ . Това

противоречие между израз (4) и физическата същност на явленията може да се обясни само с несъответствието на заместващата схема на реалната верига.

### Получаване на реална зависимост

За отстраняване на визираното по-горе противоречие и получаване на реална зависимост на  $\left| \dot{I}_r \right| = f(Y)$  за целия интервал на проводимостта на изолацията на фазите ( $0 \leq |Y| < \infty$ ) разглеждаме изчислителната заместваща схема на трифазната мрежа, показана на фиг.2.



Фиг. 2.

Използвайки метода на възловите потенциали,

получаваме:  $\frac{\dot{I}_r}{\dot{I}_A} = \frac{Y_r}{Y_{izA} + Y_r}$  или  $\dot{I}_r = \dot{I}_A \cdot \frac{Y_r}{Y_{izA} + Y_r}$ ,

където  $\dot{I}_A = (\dot{E}_A - U_{OO'}) \cdot Y_A$  е токът на фаза А;  $Y_{izA}$  - проводимостта на изолацията на фаза А;  $\dot{E}_A$  - е.д.н. на

фаза А;  $U_{OO'} = \frac{\sum_{i=1}^3 \dot{E}_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^3 Y_i} = \frac{\dot{E}_A \cdot (Y_A + a^2 \cdot Y_B + a \cdot Y_C)}{Y_A + Y_B + Y_C}$  е

напрежението между възлите  $O$  и  $O'$  (напрежение на сместване на нустралата);  $Y_A = \frac{Y^I \cdot (Y_{izA} + Y_r)}{Y_{izA} + Y_r + Y^I}$  -

проводимост на фаза А между възлите  $O$  и  $O'$ ;  $Y^I$  - проводимост, отчитаща вътрешното съпротивление на източника на трифазното напрежение и съпротивлението на фазовите проводници;  $Y_B = \frac{Y_{izB} \cdot Y^I}{Y_{izB} + Y^I}$  - проводимост

на фаза В между възлите  $O$  и  $O'$ ;  $Y_C = \frac{Y_{izC} \cdot Y^I}{Y_{izC} + Y^I}$  -

проводимост на фаза С между възлите  $O$  и  $O'$ ;  $Y_{izB}, Y_{izC}$  - проводимост на изолацията съответно на фази В и С.

За тока, протичащ през човешкото тяло, с отчитане на вътрешното съпротивление на източника на трифазното напрежение и съпротивлението на фазовите проводници при неравномерни проводимости на изолацията на фазите ( $Y_{izA} \neq Y_{izB} \neq Y_{izC}$ ), се получава:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= (\dot{E}_A - U_{OO'}) \cdot Y_A = \\ &= \left[ \dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A \cdot (Y_A + a^2 \cdot Y_B + a \cdot Y_C)}{Y_A + Y_B + Y_C} \right] \cdot Y_A =, \quad (5) \\ &= \dot{E}_A \cdot Y_A \cdot \frac{Y_B \cdot (1 - a^2) + Y_C \cdot (1 - a)}{Y_A + Y_B + Y_C} \end{aligned}$$

а

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y_A \cdot \frac{Y_B \cdot (1 - a^2) + Y_C \cdot (1 - a)}{(Y_A + Y_B + Y_C) \cdot (Y_{izA} + Y_r)} \right|, \quad (6)$$

При равни проводимости на изолацията на фазите ( $Y_{izA} = Y_{izB} = Y_{izC} = Y$ ) изразът (6) се опростява, т.е.:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y_A \cdot \frac{3 \cdot Y_{B,C}}{(Y_A + 2 \cdot Y_{B,C}) \cdot (Y + Y_r)} \right|, \quad (7)$$

където  $Y_{B,C} = Y_B = Y_C$ , или:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| 3 \cdot \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y^I \cdot \frac{Y}{3 \cdot Y^2 + 3 \cdot Y \cdot (Y_r + Y^I) + Y_r \cdot Y^I} \right|. \quad (8)$$

Анализът на израз (8) показва, че зависимостта има екстремален характер и един максимум с координати:

$$Y = \sqrt{\frac{Y_r \cdot Y^I}{3}}; \left| \dot{I}_r \right|_{\max} = \frac{\left| \dot{E}_A \cdot Y_r \cdot Y^I \right|}{Y_r + Y^I + 2 \cdot \sqrt{\frac{Y_r \cdot Y^I}{3}}}.$$

Както при  $|Y| \rightarrow 0$ , така и при  $|Y| \rightarrow \infty$ , функцията (8) се стреми към нула, т.е. отстранено е отбелязаното по-рано противоречие.

Зависимостта (8) във форма  $Y$  записваме във форма  $R, C$  и разглеждаме традиционните частни случаи:

$$1/1 \quad Y = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C; \quad \frac{1}{R} \gg \omega \cdot C. \quad \text{След}$$

заместване в (8) на  $Y = \frac{1}{R}$ ,  $Y^I = \frac{1}{r}$  и  $Y_r = \frac{1}{R_r}$ ,

получаваме:

$$\left| I_r(R) \right| = \left| \frac{3 \cdot \dot{E}_A \cdot R}{R^2 + 3 \cdot (R_r + r) \cdot R + 3 \cdot R_r \cdot r} \right|. \quad (9)$$

Зависимостта (9) също има екстремален характер с координати на максимума:

$$R = \sqrt{3 \cdot R_r \cdot r}; \left| \dot{I}_r \right|_{\max} = \frac{\left| \dot{E}_A \right|}{R_r + r + 2 \cdot \sqrt{\frac{R_r \cdot r}{3}}}.$$

На основание на предложената еквивалентна схема разглеждаме зависимостта на тока през човешкото тяло от

съпротивлението на изолацията на тази фаза, към която е станало докосването, т.е.  $\left| \dot{I}_r \right| = f(R_A)$ , позволяващо да се определи допустимата от гледна точка на безопасността стойност на съпротивлението  $R_A$ .

Приемайки  $Y_B = Y_C = Y_{B,C}$ , от (6) получаваме:

$$\left| I_r(R_A) \right| = \left| \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right| \cdot R_A}{(R_{B,C} + 2 \cdot R_r + 3 \cdot r) \cdot R_A + (R_{B,C} + 3 \cdot r) \cdot R_r} \right| \quad (10)$$

Зависимостта (10) е ограничена монотонно нарастваща функция, стремяща се към:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \left| \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right|}{R_{B,C} + 2 \cdot R_r + 3 \cdot r} \right| \quad (11)$$

2/  $\frac{1}{R} \ll \omega \cdot C$ . След заместване в (8) на

$$Y = j \cdot \omega \cdot C, \quad Y^I = \frac{1}{r} \quad \text{и} \quad Y_r = \frac{1}{R_r}, \quad \text{получаваме:}$$

$$\left| I_r(C) \right| = \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right| \cdot \omega \cdot C}{\sqrt{(1 - 3 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_r \cdot r)^2 + 9 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot (R_r + r)^2}}. \quad (12)$$

Зависимостта (12) също има екстремален характер с координати на максимума:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{3 \cdot R_r \cdot r}}; \left| \dot{I}_r \right|_{\max} = \frac{\left| \dot{E}_A \right|}{R_r + r}.$$

3/  $\frac{1}{R}$  и  $\omega \cdot C$  са от един порядък. Заместваме в

$$(8) \quad Y = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C, \quad Y^I = \frac{1}{r} \quad \text{и} \quad Y_r = \frac{1}{R_r} \quad \text{и}$$

получаваме:

$$\left| \dot{I}_r \right| = \frac{3 \cdot \left| \dot{E}_A \right| \cdot R \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2}}{\sqrt{(D)^2 + 9 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2 \cdot (R_r \cdot R + r \cdot R + 2 \cdot R_r \cdot r)^2}}, \quad (13)$$

където:

$$D = R^2 - 3.\omega^2.C^2.R_r.r.R^2 + 3.R_r.R + 3.r.R + 3.R_r.r$$

Изразът (13) позволява определяне на тока през човешкото тяло при докосване към трифазна мрежа с изолиран звезден център при произволни стойности на активното съпротивление на изолацията ( $0 \leq R < \infty$ ) и капацитет на мрежата ( $0 \leq C < \infty$ ).

## Изводи

1. Изчисляването на тока през човешкото тяло по заместваща схема, която не отчита вътрешното съпротивление на източника на трифазно напрежение и съпротивлението на проводниците, довежда до неверен извод за характера на изменение на тока от проводимостите на изолацията на фазите в областта на големите им стойности ( $Y \rightarrow \infty$ ).

2. Отчитането на вътрешното съпротивление в заместващата схема позволява да се получат аналитични зависимости за тока през човешкото тяло от проводимостта на изолацията във всички диапазони на нейното изменение от 0 до  $\infty$ .

3. Зависимостта на тока през човешкото тяло от проводимостта на изолацията на фазите има екстремален характер, при което  $\left| \dot{I}_r \right| \rightarrow 0$  при  $|Y| \rightarrow 0$  и  $|Y| \rightarrow \infty$ .

## Литература

- Мотузко, Ф. Я., С. М. Михальчук. 1973. Защита от поражение электрических токов методом компенсации емкостных токов через изоляцию. *Известие высших учебных заведений, Энергетика, № 6*.
- Мотузко, Ф. Я. 1973. Защитные устройства в электроустановках. М., *Энергия*.
- Ревякин, А. И., Б. И. Кашолкин. 1980. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках. М., *Энергия*.
- Сычев, Л. И., Е. Ф. Цапенко. 1978. Шахтные гибкие кабели и электробезопасность сетей. М., *Недра*.
- Ягураев, Б. М., Н. Ф. Шишкин. В. В. Назаров 1982. Защита от электропоражение в горной промышленности. М., *Недра*.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електротехника“.