

## АНАЛИЗ НА РУДНИЧНИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ С ИЗОЛИРАНА НЕУТРАЛА

**Владимир Перпелицев, Иван Стоилов**

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София*

**РЕЗЮМЕ.** Изведени са аналитични зависимости за напрежението с нулева последователност, напреженията спрямо земя и тока на земно съединение за мрежите с изолиран звезден център. За руднични мрежи с напрежение 6kV са построени графични зависимости на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение при различни стойности на капацитета и активната изоляционна проводимост на фазите спрямо земя. Анализирани са зависимостите на тока на земно съединение от големината на преходното съпротивление към земя.

### ANALYSIS OF MIDDLE VOLTAGE ELECTRICAL GRIDS WITH ISOLATED NEUTRAL GROUNDING IN MINES

**Vladimir Perpelitsev, Ivan Stoilov**

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

**ABSTRACT.** In the current paper are led analytic equations for voltage with zero successions, voltages compared to earth and earth fault current in grids with isolated neutral grounding. There are simulated graphical relationships between voltage with zero succession and earth fault current, at different capacities to ground and active insulation conductivity phase to ground in mine middle voltage electrical grids 6kV. In analysis is led relation between earth fault current and magnitude of transition resistance to ground.

### 1. Въведение

Режимът на работа с изолиран звезден център е най масово прилаганият в откритите рудници у нас. Вторичните намотки на трансформаторите 6kV, като правило, са свързани в триъгълник, поради което неутралната точка физически отсъства. Правилникът за безопасност на труда при разработване на находища по открит начин (1996) ограничава прилагането на този режим за мрежи с максимален ток на земно съединение 15A, но на практика това изискване не се спазва. Голяма част от електрическите мрежи 6-20kV в нашите минни предприятия работят с изолиран звезден център при капацитивен ток, значително надвишаващ регламентираните 15A.

Исторически режимът на работа с изолиран звезден център е първият, приложен в мрежите средно напрежение (Нанчев Н., 1955). Основните му предимства са:

- малък ток в мястото на повредата (при ниски стойности на капацитета на мрежата към земя);
- възможност за работа известно време при наличие на земно съединение в мрежата.

Правилникът за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин изисква автоматично изключване от релейната защита при възникване на земно съединение, така че второто от изброените предимства не е актуално у нас .

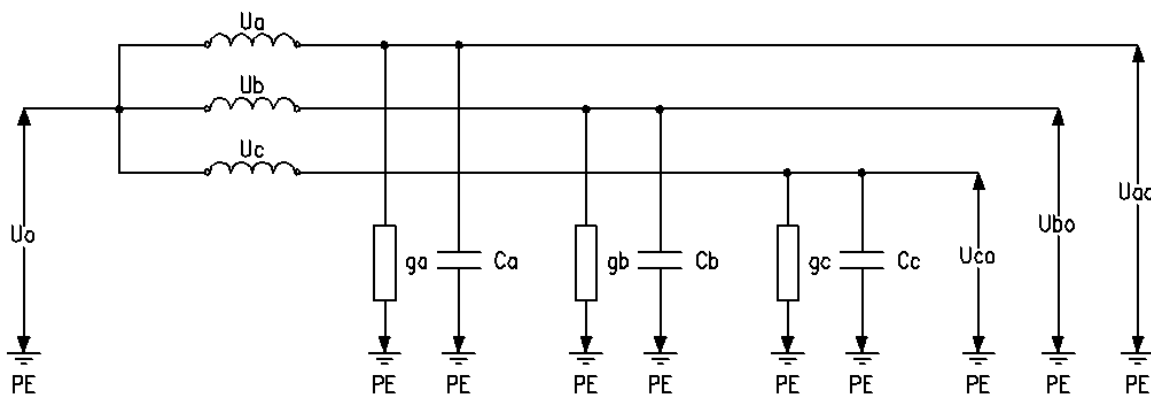
Недостатъците на този режим на неутралата са (Багаев В., 2009; Пенчев С., 2011):

- възможност за възникване на дъгови пренапрежения при малки токове в мястото на земно съединение;
- възможност за възникване на многоместни повреди (излизане от строя на няколко електродвигателя, кабели) при пробив в изоляцията в други изводи, поради дъгови пренапрежения;
- възможност за продължително въздействие на дъговите пренапрежения върху изоляцията, което води до намаляване на нейния срок на служба;
- необходимост изоляцията на електрооборудването спрямо земя да бъде оразмерена за линейното напрежение;
- възможност за възникване на късо съединение през земя и съответно големи поражение на електрооборудването;
- трудно откриване на мястото на земно съединение;
- опасност от електротравми на персонала при продължително съществуване на земното съединение;
- трудности при обезпечаването на правилна работа на релейната защита, тъй като реалният ток на земно съединение зависи от режима на работа на мрежата (броя на включените изводи).

Недостатъците на режима на работа с изолирана неутрала са много съществени, а предимството за възможност за работа с еднофазно земно съединение е доста спорно. Така винаги има вероятност за възникване на второ земно съединение на други изводи и съответно едновременно изключване на два кабела, два двигателя или въздушни линии.

Това е основната причина в много страни като САЩ, Канада, Англия, Австралия, Белгия, Франция, Португалия и др. да се откажат от системата с изолиран звезден център още в 50-те години на миналия век. От 2003г. в Русия за

мрежите средно напрежение са разрешени всички режими на работа, освен системата с директно заземен звезден център (Сирота М., 1985).



Фиг. 1.

## 2. Аналитични зависимости

Означенията на показаната на фиг.1 мрежа с изолирана неутрала на трансформатора са, както следва:

- напрежение на неутралата  $\dot{U}_0$ ;
- напрежение на фазите спрямо земя  $\dot{U}_{a0}, \dot{U}_{b0}, \dot{U}_{c0}$ ;
- фазни напрежения  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ ;
- активни изолационни проводимости на изолацията към земя  $g_a, g_b, g_c$ ;
- капацитет на фазите спрямо земя  $C_a, C_b, C_c$ ;

Несиметрията в активните изолационни проводимости се дефинира чрез въведения векторен коефициент (Стоилов И.Г., 1988):

$$\dot{K}_r = \frac{g_a + a^2 g_b + a g_c}{g_a + g_b + g_c}$$

Несиметрията на капацитетите спрямо земя се дефинира чрез векторен коефициент (Нанчев Н., 1955):

$$\dot{K}_c = \frac{C_a + a^2 C_b + a C_c}{C_a + C_b + C_c}$$

При теоретични изследвания, свързани с електробезопасността, работата на защитите от земни съединения и особено при анализ на входните параметри на защитите е необходимо да се оцени влиянието на естествената несиметрия в мрежата (Стоилов И., 1988). Чрез коефициентите на несиметрия при необходимост може да се отчете влиянието на естествената несиметрия на активните изолационни проводимости и несиметрията на капацитета на фазите спрямо земя върху напрежението с нулева последователност, напреженията на фазите спрямо земя и тока на еднофазно земно съединение.

При въвеждане на означенията:  $g_0 = \frac{g_a + g_b + g_c}{3}$  -

средна активна проводимост на фаза спрямо земя;

$C_0 = \frac{C_a + C_b + C_c}{3}$  - среден капацитет на фаза спрямо

земя;

$tg\delta = \frac{g_0}{\omega C_0}$  - обобщен показател на изолацията спрямо

земя, могат да се напишат следните зависимости:

### 2.1. Напрежение с нулева последователност

При еднофазно земно съединение в мрежите с изолиран звезден център върхът на вектора на  $\dot{U}_0$ , описва полуокръжност. Напрежението с нулева последователност при земно съединение през преходно съпротивление  $g'$  се определя с изразите:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg\delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg\delta + j) + g'_a} \quad (1)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg\delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg\delta + j) + g'_b} \quad (2)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg\delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg\delta + j) + g'_c} \quad (3)$$

### 2.2. Напрежения на фазите спрямо земя

Напреженията спрямо земя при еднофазно земно съединение се определят с уравненията:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{U}'_a = U \left[ 1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]; \quad (4)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[ a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]; \quad (5)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[ a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]. \quad (6)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{U}'_a = U \left[ 1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (7)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[ a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (8)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[ a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (9)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{U}'_a = U \left[ 1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]; \quad (10)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[ a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]; \quad (11)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[ a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]; \quad (12)$$

### 2.3. Ток на земно съединение

Токът на земно съединение през преходна проводимост  $g'$  се определя с изразите:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{I}_a = U g'_a \left[ 1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_a} \right]; \quad (13)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{I}_b = U g'_b \left[ a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_b} \right]; \quad (14)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{I}_c = U g'_c \left[ a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + 3\omega C_0 \dot{K}_c + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + g'_c} \right]. \quad (15)$$

### 3. Изследване на параметрите на мрежите в зависимост от големината на преходното съпротивление при земно съединение

Изследването е проведено при следните допускания:

- симетрия в активните и капацитивните изолационни проводимости на мрежата спрямо земя;
- изменение на стойностите на преходната проводимост при земно съединение  $g'$  от 0 до 1S (1Ω);
- линейно напрежение на изследваната мрежа - 6 kV;
- земното съединение се реализира във фаза А.

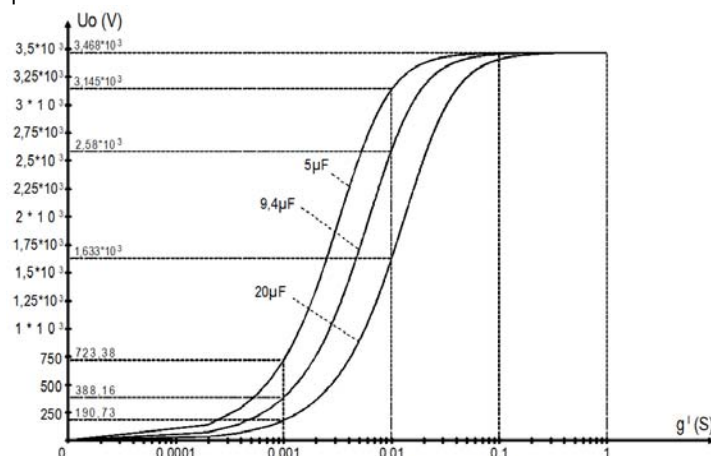
На база на изведените уравнения с помощта на програмата „MathCad“ са получени следните зависимости:

#### 3.1. Ефективна стойност на напрежението с нулева

последователност  $\dot{U}_0$  във функция от преходното съпротивление при земно съединение  $g'$  (фиг. 2).

Възприето е изолационната проводимост на фазите спрямо земя  $g_a = g_b = g_c = 0,000001S$  (1MΩ).

Напрежението с нулева последователност е изследвано при стойности на капацитета на фазите спрямо земя  $C_1 = 5\mu F$ ,  $C_2 = 9,4\mu F$  и  $C_3 = 20\mu F$ . Стойността на капацитета на фазите спрямо земя  $C_2 = 9,4\mu F$  е получена по изчислителен път за електрическата мрежа 6kV на открития рудник „Елаците“ за конфигурация на мрежата в средата на 2013 г. Тази стойност е възприета при анализирането на количествените параметри на рудничните мрежи с резистивно заземена неутрала (Перпелицев В, Ив. Стоилов, 2013). По този начин е възможна съпоставка на изследваните параметри на двата вида заземяване на неутралата.



Фиг. 2.



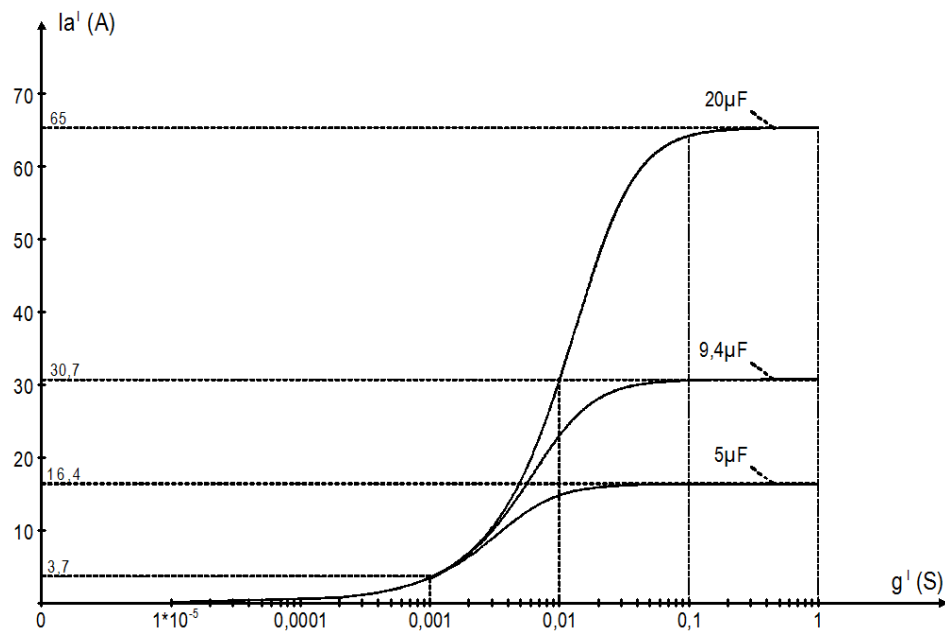
### 3.2. Ефективната стойност на тока на земно съединение $\dot{I}'_a$ във функция от преходното съпротивление при земно съединение (Фиг. 4).

Активната изолационна проводимост на фазите спрямо земя е приета  $g_a = g_b = g_c = 0,000001S$  ( $1M\Omega$ ).

От графичните зависимости, показани на Фиг. 4, могат да се направят следните заключения:

- при земно съединение със стойност на преходната проводимост  $g' = 0,001S$  ( $1000\Omega$ ), токът на земно съединение има много ниска стойност ( $3,7A$ ) и практически не зависи от големината на капацитета на мрежата. Очевидно е, че токовете непосредствени защити от земни съединения в мрежите с изолиран звезден център няма да работят ефективно, независимо от големината на капацитета на мрежата.

- при земно съединение с преходна проводимост, изменяща се в границите от  $g' = 0,001S$  ( $1000\Omega$ ) до  $g' = 0,01S$  ( $100\Omega$ ) токът на земно съединение нараства значително, като най-стръмна е кривата, показваща изменението на тока на земно съединение в случая с мрежата с най-голям капацитет ( $C_3 = 20\mu F$ );



Фиг. 4.

Едно сравнение на резултатите, показани на фиг. 4, и подобни изследвания в електрически мрежи средно напрежение с резистивно заземена неутрала със същите изолационни параметри на мрежата ( $g_a = g_b = g_c = 0,000001S$  ( $1M\Omega$ ),  $C_2 = 9,4\mu F$ ), (Перпелицев В, Ив. Стоилов, 2013) показва следното:

- в зависимост от големината на заземяващия резистор токът на метално земно съединение в случай на заземена през резистор неутрала нараства както следва:

- при заземена неутрала със стойност на резистора  $120\Omega$  токът на метално земно съединение нараства от  $30,7A$  до  $41,8A$  или с  $1,36$  пъти;

- при стойност на резистора  $80\Omega$  нарастването е  $1,72$  пъти;

- в диапазона на изменение на преходната проводимост при земно съединение  $g' = 0,01S$  ( $100\Omega$ ) до  $g' = 0,1S$  ( $10\Omega$ ) при мрежите с малък капацитет ( $C_1 = 5\mu F$ ) нарастването на тока на земно съединение е незначително;

- при мрежата с голям капацитет ( $C_3 = 20\mu F$ ) токът на земно съединение нараства повече от два пъти.

Максималната си стойност  $\dot{I}'_a$  достига при  $g' = 0,1S$  ( $10\Omega$ ), където при  $C_1 = 5\mu F$  -  $\dot{I}'_a \approx 16,4A$ , при

$C_2 = 9,4\mu F$  -  $\dot{I}'_a \approx 30,7A$ , а при  $C_3 = 20\mu F$  -

$\dot{I}'_a \approx 65A$ . След стойности на  $g' = 0,1S$  ( $10\Omega$ ) до  $g' = 1S$  ( $1\Omega$ ) токът на земно съединение не се изменя значително и графиките имат линеен характер.

- при стойност на резистора  $60\Omega$  нарастването е  $2,09$  пъти.

Безспорно по-високите стойности на тока на земно съединение в рудничните мрежи средно напрежение влошават условията за безопасна работа, главно поради възможността да възникнат по-високи допирни напрежения. От друга страна по-сигурната работа на релейните защити от земни съединения води до минимизиране на вероятността за незадействане и съответно съществуване на опасни допирни напрежения продължително време. Окончателното решение за избор на режима на работа на неутралата на рудничните трансформатори средно напрежение трябва да става след обстоен анализ, както на експлоатационните предимства, така и по отношение на нивото на електробезопасност.

## Заклучение

Изведените аналитични зависимости дават възможност за провеждане на изследвания на електрически мрежи с изолиран звезден център на трансформатора. Има възможност при необходимост да се отчита естествената несиметрия в активните и капацитивните изолационни проводимости спрямо земя. Получените количествени стойности за влиянието на големината на преходната проводимост в мястото на земно съединение за електрически мрежи с малък, среден и голям капацитет на фазите спрямо земя могат да се използват за ориентировъчни преценки на изследваните параметри. Те могат да служат и като ориентир при преценка на въведените настройки на релейните защиты от еднофазни земни съединения.

С разрастването на рудника се увеличава и дължината на кабелните линии, което води до увеличаване на капацитета на мрежата спрямо земя. И това поставя под въпрос целесъобразността от използване на режима с изолирана неутрала в мрежите с голям капацитет спрямо земя.

При руднични мрежи с голям капацитет на фазите спрямо земя е необходимо да се премине към резистивно заземяване на неутралата. При този режим на неутралата не се изискват сложни релейни защиты, лесно се осигурява тяхната селективност, отсъстват дъгови пренапрежения и ферорезонансни процеси (Перпелицев В, Ив. Стоилов, 2013). Освен това не се изискват големи капиталовложения и големи промени в съществуващата мрежа. У нас има натрупан известен опит с изграждането на

руднични мрежи с резистивно заземена неутрала. Такива са в „Мини Марица Изток“ ЕАД и „Асарел-Медет“ АД.

## Литература

- ПРАВИЛНИК за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин, 1996, Министерство на труда и социалните грижи. Главна инспекция по труда, София.
- Багаев Д.В., В.Н.Сазонов, С.О. Астафьев, В.И. Кучеренко, 2009, *Резистивное заземление нейтрали сетях 6-35кВ в ОАО "МРСК Волги"*. КАБЕЛЬ-news, № 3.
- Нанчев Н., 1955, *Земни съединения в електрическите системи.*, С., Наука и изкуство.
- Пенчев Св., 2011, *Контрол и измерване в електроснабдителните системи*, Записки, ТУ Габрово.
- Стоилов И.Г., 1988, *За несиметрията на проводимостта спрямо земя в мрежите с изолиран звезден център*. Годишник на ВМГИ, София, т. XXXIV св. IV.
- Сирота И.М., С.Н.Кисленко, А.М. Михайлов. 1985, *Режими нейтрали електрических сетей*. Киев, Наукова думка.
- Перпелицев В., Ив. Стоилов, 2013, Анализ на рудничните електрически мрежи средно напрежение с резистивно заземена неутрала, Годишник на МГУ «Св. Иван Рилски», София, т. 56, св. III.

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електрификация на мините“.