

АНАЛИЗ НА РУДНИЧНИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ С РЕЗИСТИВНО ЗАЗЕМЕНА НЕУТРАЛА

Владимир Перпелицев, Иван Стоилов

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

РЕЗЮМЕ. За руднични мрежи 6 kV с голям капацитивен ток е предложено преминаване от система с изолирана неутрала към система с резистивно заземена неутрала. Изведени са аналитични зависимости за напрежението с нулева последователност, напреженията спрямо земя и тока на земно съединение за мрежите със заземен през резистор звезден център. Изследвано е влиянието на преходната проводимост в мястото на земно съединение върху модула на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение при различни стойности на заземяващия резистор.

ANALYSIS OF MIDDLE VOLTAGE ELECTRICAL GRIDS WITH RESISTANCE EARTHED NEUTRAL IN MINES

Vladimir Perpelitsev, Ivan Stoilov

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

ABSTRACT. The current paper analysis middle voltage electrical grids 6kV in mines with high capacity current. For this grids it's make a proposal to passing from system with isolated neutral to system with resistance earthed neutral. In analysis is led analytic equations for voltage with zero successions, voltages compared to earth and earth fault current. It is make analyses the influence of the conductivity in the transitional place of the ground fault on the modulus of the zero sequence voltage and the ground fault at different values of a grounding resistor.

Въведение

Режимът на работа на звездния център на трансформаторите в електрическите мрежи средно напрежение в откритите рудници се определя от следните нормативни документи:

- Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии;
- Правилник за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин.

Наредба №3 определя режимите на заземяване на неутралата и съответните изисквания към устройството на заземителните инсталации в електрическите уредби над 1000V.

Правилникът за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин определя по-конкретни изисквания към режимите на работа на звездния център на трансформаторите. Указано е, че въздушно-кабелните мрежи за средно напрежение в откритите рудници могат да работят с изолиран звезден център при капацитивен ток до 15 A. При ток над 15 A се препоръчва работа със заземен, през дъгогасителен реактор, звезден център. При ток над 15A и когато кабелната част е по-голяма от 40% от общата дължина на мрежата трябва да се прилага система със заземен през резистор звезден център.

При всички случаи е необходимо да има релейни защиты за автоматично изключване на земните съединения,

защита срещу пренапрежения и защитно заземяване. Съпротивлението на заземителното устройство в откритите рудници не трябва да надвишава 4Ω .

В откритите рудници за добив на руда и въглища у нас като правило се прилага системата с изолиран звезден център на трансформатора. В част от електрическите мрежи на откритите рудници в „Мини Марица-Изток“ ЕАД е въведено заземяване на звездния център на трансформаторите през високоомен резистор (Анев, 1994).

Електрическите мрежи 6 kV в откритите рудници на големите миннообогатителни предприятия „Елаците мед“ АД и „Асарел–Медет“ АД през последното десетилетие претърпяха значително развитие. Бяха въведени в експлоатация съвременни мощни електрохидравлични багери, изградени поточно-транспортни системи, построени нови цехове. Това доведе до значително увеличаване на общата дължината на кабелните електропроводи и съответно до нарастване на капацитивния ток. Електрическата уредба 6 kV в рудничния комплекс на „Елаците мед“ АД към настоящия момент има капацитивен ток в максимален режим 31,93 A. Дължината на кабелната част на мрежата е 3,4 пъти по-голяма от тази на въздушната и определя основната част от капацитивния ток. Капацитивният ток, създаван от въздушната електрическа мрежа, определен приблизително от известни графични зависимости [Нанчев, 1955] и емпирични формули, е под 1 A.

Вторичните намотки на тринамотъчните трансформатори 110/6/6 kV в подстанция „Руднична“ на „Асарел – Медет“ АД работят разделно. Общата дължина на стационарната кабелната мрежа към намотка I на трансформатора определя капацитивен ток $I_{c1} = 30,67$ А. Отношението на общите дължини на кабелната част към въздушната е 1,85. Въздушната част от електрическата мрежа създава и тук капацитивен ток под 1 А.

Освен несъответствието с изискванията на Правилника за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин, работата с изолиран звезден център на цитираните електрически системи създава проблеми и със селективността на защитите от земни съединения. Например извод ЦПТ от подстанция „Руднична“ на „Асарел-Медет“ АД има собствен капацитивен ток 26 А при общ капацитивен ток на мрежата 30,67 А. Очевидно приложената в случая непосочна токова защита от земни съединения Siprotect 7SJ6225 е неефективна. Необходимо е прилагане на посочна защита от земни съединения.

Електрическите мрежи в цитираните руднични комплекси не отговарят на изискванията на Правилника за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин и съществуват проблеми със защитата от земни съединения. Необходимо е преоценка на режимите на работа на неутралата като се отчете настъпилата промяна в отношенията кабелна - въздушна част. Считаме, че за цитираните електрически мрежи е целесъобразно да преминат от работа с изолиран звезден център към система със заземен през високоомен резистор звезден център.

Обикновено вторичните намотки на силовите трансформатори са свързани в триъгълник и резисторът се свързва към мрежата посредством устройство за заземяване на звездния център. То представлява специален трансформатор, чиито намотки са свързани Y-0/D или Z-0 и има нисък импеданс за тока с нулева последователност. Възможни са два варианта за заземяване на неутралата: с високоомен или с нискоомен резистор. За рудничните мрежи средно напрежение е актуално само високооменото заземяване. Големината на тока, създаван от резистора според повечето автори трябва да се избира от условието $I_r = (0,5 - 1,0) I_c$ (Анев, 1994). При равенство на капацитивния и активния ток, пълният ток на метално земно съединение няма да бъде по-голям от $\sqrt{2}$ от капацитивния ток на мрежата.

Аналитични зависимости

При аналитични изследвания на мрежите средно напрежение в това число и рудничните обикновено се пренебрегва активното изолационно съпротивление на мрежата. Отчита се само капацитетът на мрежата и в някои случаи несиметрията му чрез коефициента на

несиметрия $\dot{K}_c = \frac{C_a + a^2 C_b + a C_c}{C_a + C_b + C_c}$ (Нанчев, 1955),

където C_a , C_b и C_c са капацитетите на фазите спрямо

земята. Това приемане е правилно за въздушните електрически мрежи, тъй като те имат много високо активно изолационно съпротивление и е налице несиметрия в капацитета спрямо земя.

Считаме, че рудничните мрежи с описаната конфигурация следва да бъдат разглеждани по отношение на изолацията спрямо земя като кабелни. Кабелите в рудничните електрически мрежи в основната си част са положени на открито, а багерните кабели са подложени и на механични натоварвания. В рудничните мрежи има не малък брой двигатели с номинално напрежение 6 kV, което също допринася за намаляване на общото активно изолационно съпротивление на мрежата. Следователно, при анализа на рудничните електрически мрежи с преобладаваща кабелна част, не трябва да се пренебрегва активната съставна на изолационното съпротивление. Несиметрията в мрежи от този тип се определя основно от активните изолационни съпротивления спрямо земя на отделните фази.

В преобладаващата част от анализите се приема, че земното съединение е метално и не се отчита преходното съпротивление в мястото на земно съединение. Практиката е показала, че при въздушно-кабелните мрежи са възможни земни съединения през значителни съпротивления. Тъй като напреженията спрямо земя, респективно токът на земно съединение, и съответно работата на релейните защити зависят от големината на преходното съпротивление е необходимо при изследвания то да бъде отчитано (Сапунков и др., 2012).

При аналитичното изследване на руднични електрически мрежи с конфигурация подобна на описаните по-горе (фиг.1) се приемат следните допускания:

- поради незначителното участие на въздушната част на мрежата във формирането на общия капацитивен ток се приема равенство и симетрия на капацитета на фазите спрямо земята а

- отчита се и големината на активната изолационна проводимост и несиметрията, която тя обуславя $g_a \neq g_b \neq g_c$;

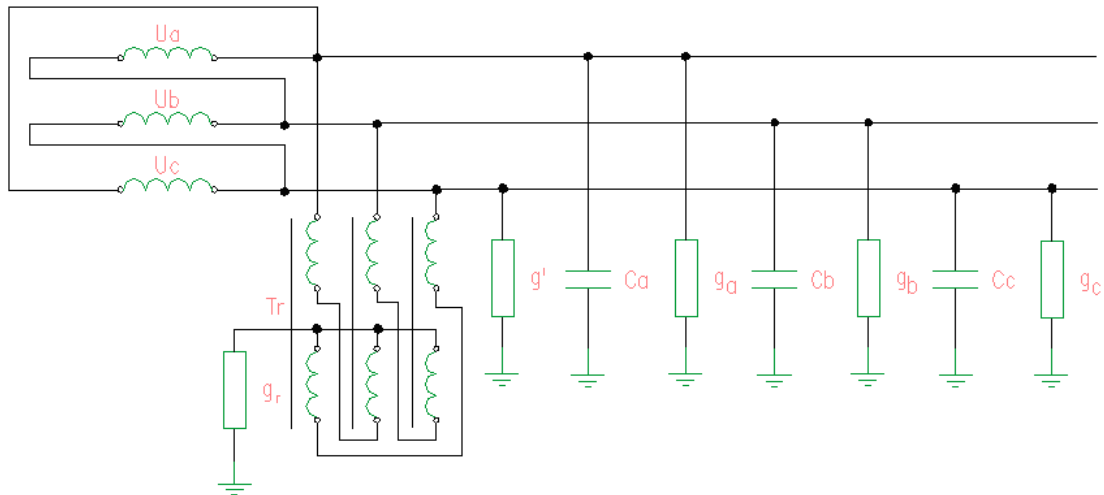
- отчита се преходната проводимост в мястото на земно съединение g' ;

- отчита се проводимостта на резистора g_r и на устройството за присъединяване към електрическата мрежа.

Несиметрията в активните изолационни проводимости се дефинира чрез въведения от Стоилов (1988) векторен

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

Уравненията за напрежението с нулева последователност, напреженията спрямо земя и токовете на земно съединение, при направените допускания придобиват вида:



Фиг. 1 Заместваща схема на руднична електрическа мрежа

Напрежение с нулева последователност

При теоретични изследвания, свързани с електробезопасността, работата на защитите от земни съединения и особено при анализ на входните параметри на защитите с предпазно шунтиране е наложително да се оцени влиянието на естествената несиметрия в мрежата (Ягудев и др., 1988). В този случай при възприетите допускания напрежението с нулева последователност, определено от естествената несиметрия на активните изолационни проводимости, се дава с израза (Стоилов, 1988):

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{K}_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0}$$

където: $tg \delta = \frac{g_0}{\omega C_0}$ отразява активната и капацитивната

изолационна проводимост на мрежата;

$g_0 = \frac{g_a + g_b + g_c}{3}$ - средната активна проводимост на

фаза спрямо земя;

$C_0 = C_a = C_b = C_c$ - капацитетът на фаза спрямо земя;

Y_0 - пълната проводимост на резистора и устройството за създаване на изкуствен звезден център;

ω - ъгловата честота.

При еднофазно земно съединение в мрежите с резистивно зазамена неутрала, напрежението с нулева последователност има по ниски стойности в сравнение с мрежите с изолиран звезден център. Върхът на вектора на

\dot{U}_0 описва елипса (Сирота и др. 1985), а не полуокръжност, както е при системите с изолиран звезден център. Напрежението с нулева последователност при земно съединение през преходно съпротивление g' се определя с изразите:

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a}; \quad (1)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{U}'_0 = U \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_b}; \quad (2)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{U}'_0 = \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_c}. \quad (3)$$

Напрежения на фазите спрямо земя

Напреженията на фазите спрямо земя, определени от естествената несиметрия на активните изолационни проводимости са:

$$\dot{U}_a = U \left(1 - \frac{K_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0} \right); \quad (4)$$

$$\dot{U}_b = U \left(a^2 - \frac{K_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0} \right); \quad (5)$$

$$\dot{U}_c = U \left(a - \frac{K_r \cdot tg \delta}{tg \delta + j + Y_0} \right). \quad (6)$$

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

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{U}'_a = U \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a} \right]; \quad (7)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a} \right]; \quad (8)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a} \right]. \quad (9)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{U}'_a = U \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_b} \right]; \quad (10)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_b} \right]; \quad (11)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_b} \right]; \quad (12)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{U}'_a = U \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_c} \right]; \quad (13)$$

$$\dot{U}'_b = U \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_c} \right]; \quad (14)$$

$$\dot{U}'_c = U \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_c} \right]; \quad (15)$$

Ток на земно съединение

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

- земно съединение във фаза А:

$$\dot{I}'_a = U g'_a \left[1 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + g'_a}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_a} \right]; \quad (16)$$

- земно съединение във фаза В:

$$\dot{I}'_b = U g'_b \left[a^2 - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a^2 g'_b}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_b} \right]; \quad (17)$$

- земно съединение във фаза С:

$$\dot{I}'_c = U g'_c \left[a - \frac{3\omega C_0 tg \delta \dot{K}_r + a g'_c}{3\omega C_0 (tg \delta + j) + Y_0 + g'_c} \right]. \quad (18)$$

Изследване на влиянието на преходната проводимост

Анализирана е руднична въздушно-кабелна мрежа с напрежение $U_H = 6$ kV. Кабелната част от мрежата е с обща дължина 11km и има капацитет на фазите спрямо земя $C_a = C_b = C_c = 9,4 \mu F$. Активната изолационна проводимост на фазите спрямо земя се приема $g_a = g_b = g_c = 0,000001 S$ (1M Ω). Приема се симетрия между капацитета и активната проводимост на фазите спрямо земя. Анализирани са напрежението с нулева последователност и токът на земно съединение в зависимост от големината на преходната проводимост при земно съединение в мрежата. Стойностите на преходната проводимост при земно съединение g' е прието да се изменят от 0.001S (1000 Ω) до 1S (1 Ω) (Сапунков и др. 2012).

Разгледани са три варианта:

- при големина на активното съпротивление за заземяване на неутралата 60 Ω (представен с непрекъсната линия на фиг. 2 и 3);

- при големина на активното съпротивление за заземяване на неутралата 80 Ω (представен с пунктирна линия на фиг. 2 и 3);

- при големина на активното съпротивление за заземяване на неутралата 120 Ω (представен с прекъсната линия на фиг. 2 и 3).

При направените изчисления се пренебрегва импеданса на присъединяващия трансформатор. На базата на изведените уравнения, с помощта на програмата „MathCad”, са получени и графично представени следните зависимости:

а) ефективната стойност на напрежението с нулева последователност \dot{U}_0 във функция от преходната проводимост при земно съединение g' (Фиг.2).

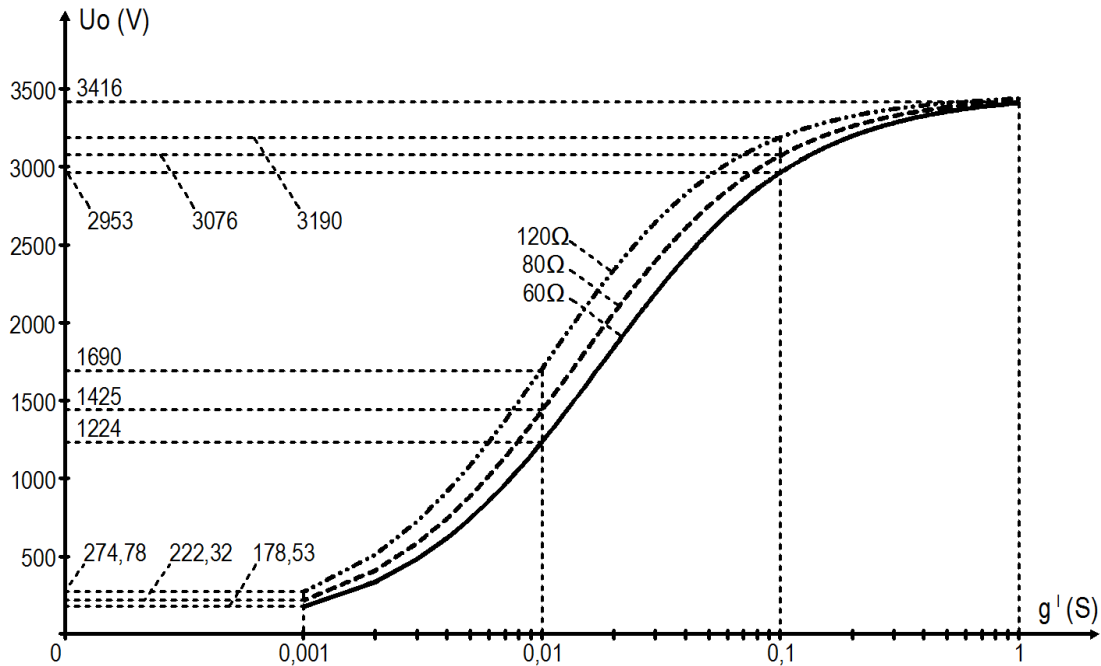
От графичните зависимости, показани на Фиг.2, се вижда характерът на изменение на напрежението с нулева последователност за различни стойности на резистора в неутралата и могат да се направят следните изводи:

- с увеличаване големината на активното съпротивление за заземяване на неутралата $R = 1/g_r$, стойностите на

напрежението с нулева последователност \dot{U}_0 нарастват.

- увеличаването на преходната проводимост при земно съединение g' води до намаляване на относителната разлика между стойностите на напрежението с нулева последователност и кривите при $g' = 1S(1\Omega)$ на практика съвпадат.

- големината на активното съпротивление за заземяване на неутралата оказва най-голямо влияние на \dot{U}_0 при високи стойности на преходната проводимост при земно съединение - 0,001S (1000 Ω).



Фиг. 2

б) ефективната стойност на тока на земно съединение на фаза А I'_a във функция от преходната проводимост при земно съединение g' (Фиг.3).

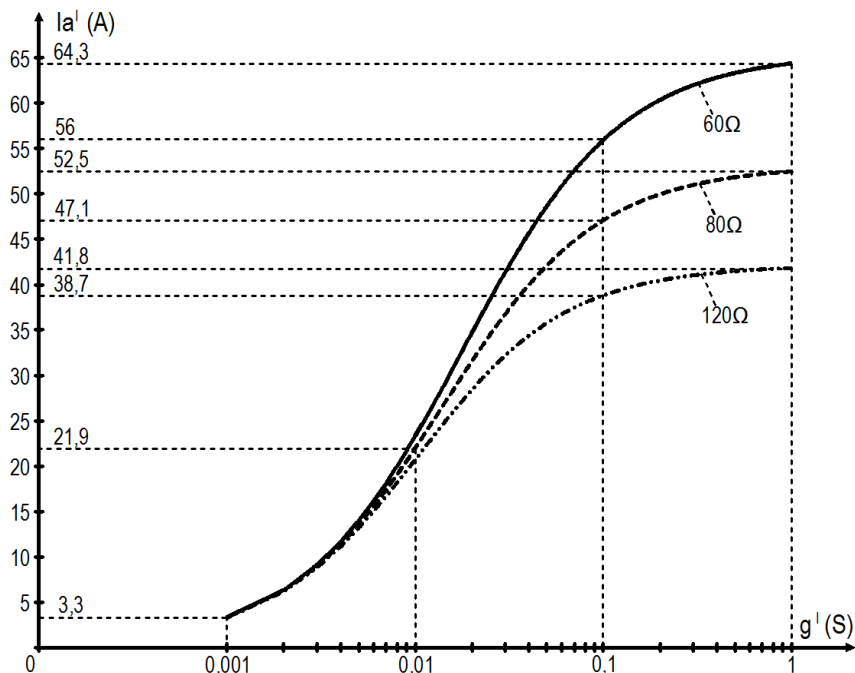
От графичните зависимости на Фиг.3 могат да се направят следните изводи:

- увеличаването на големината на активното съпротивление, свързано към устройството за създаване на изкуствен звезден център, води до намаляване на ефективната стойност на тока на земно съединение на фаза А I'_a ;

- при високи стойности на g' (0,001S - 1000Ω) и различни стойности на активното съпротивление в неутралата (60Ω, 80Ω и 120Ω) разлика в големината на тока на земно съединение почти няма;

- влиянието на преходната проводимост g' върху големината на тока на земно съединение в диапазона 0,001S (1000Ω) - 0,01S (100Ω) е незначително;

- най-значително е влиянието на стойността на резистора в неутралата е при метално земно $g' = 1S$ (1Ω). Отношението на големините на тока на земно съединение в този случай са 1 : 1,25 : 1,54 спрямо тока в мрежа с резистор в неутралата 120 Ω.



Фиг. 3

Анализът на влиянието на големината на преходната проводимост при земно съединение върху модула на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение е проведен с цел да се прецени работата на релейните защиты от земни съединения. Въведени са параметри за характерна въздушно-кабелна руднична мрежа, средно напрежение, за която са възможни ниски стойности на преходната проводимост при земно съединение. Например при падане на проводник от въздушен електропровод на суха или замръзнала почва. При ниски стойности на преходната проводимост в мястото на земно съединение $0,001\text{S}$ (1000Ω), което е напълно реално за рудничните мрежи, напрежението с нулева последователност, както и токът, протичащ през защитата на повредения извод, имат много ниски стойности. Това води до незаработване на първо място на непосочните защиты от земно съединение, тъй като те имат високи стойности на настройките (отстройват се от капацитивния ток на защитавания извод). Посочните защиты от земни съединения са много по-чувствителни, тъй като те се отстройват само от тока на небаланс. Но много ниските стойности на напрежението с нулева последователност могат да доведат до нестабилна работа на тези защиты или до отказ.

Заклучение

Известни са предимствата на системата със заземяване на неутралата пред системата с изолиран звезден център (Титенков, 2003; Сирота и др., 1985; Миронов, 2006; Пенчев, 2011): липсват дъгови пренапрежения; има възможност да се организира селективна релейна защита от земни съединения; отсъстват ферорезонансни процеси и др. Същевременно преминаването от система с изолирана неутрала към система с високоомно заземяване не изисква съществени промени в съществуващата електрическа мрежа и големи капиталовложения. Следователно за рудничните електрически мрежи с голяма дължина на кабелните линии може да се препоръча преминаване от система с изолирана неутрала към система със заземена през високоомен резистор неутрала.

Изведените аналитични зависимости за напрежението с нулева последователност, напреженията на фазите спрямо земя и тока на земно съединение са приложими за изследване на руднични електрически мрежи средно напрежение със заземена през резистор неутрала. Характерно е, че изследването се извършва като се отчита активната и капацитивната изолационна проводимост чрез обобщения показател $tg\delta$ и естествената несиметрия в

активната изолационна проводимост чрез векторния коефициент K_r . От проведеня анализ за влиянието на преходната проводимост в мястото на земно съединение на напрежението с нулева последователност и тока на земно съединение се установи, че при възникване на земно съединение с ниски стойности на преходната проводимост, дори съвременните чувствителни посочни защиты от земни съединения могат да бъдат неефективни.

Литература

- НАРЕДБА № 3 за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии. Обн., ДВ, бр. 90 и 91 от 2004г
- ПРАВИЛНИК за безопасността на труда при разработване на находища по открит начин. Министерство на труда и социалните грижи. Главна инспекция по труда. София, 1996.
- Анев Г., 1994. Полуефективно заземяване на звездния център на мрежите за средно напрежение в откритите рудници. Годишник на Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски" т.40, св. III "Механизация, електрификация и автоматизация на минното производство", С.
- Титенков С.С. 2003. 4 режима заземления неутрала в сетях 6-35 кВ. Изолированную нейтраль обявим вне закона. ж. "Новости электротехники" №5 (23).
- Сирота И.М., С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. 1985. Режимы неутрала электрических сетей. Киев, Наукова думка.
- Миронов И.А., 2006. Проблемы выбора режимов заземления неутрала в сетях 6-35кВ "ЭЛЕКТРО" № 5.
- Пенчев Св., 2011. Контрол и измерване в електроснабдителните системи. Записки, ТУ Габрово.
- Types of neutral earthing in power distribution(part 1). <http://electrical-engineering-portal.com>
- Ягудаев Б.М., Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. 1982. Защита от электропоражения в горной промышленности. М. Недра.
- Стоилов И.Г. 1988. За несиметрията на проводимостта спрямо земя в мрежите с изолиран звезден център. Годишник на ВМГИ, С., т. XXXIV св. IV.
- Нанчев Н. 1955. Земни съединения в електрическите системи., С. Наука и изкуство.
- Сапунков М.Л., И.А. Костарев, А.А. Худяков. 2012. Исследование влияния переходного сопротивления на характеристики защиты от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности. Горное дело, №4.