

## ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПЕТПРОВОДИНТЕ СИСТЕМИ С ИЗОЛИРАНА НЕУТРАЛА (IT) В МИНИТЕ

Стефан Чобанов<sup>1</sup>, Менто Ментешев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> СМС-С ЕООД, 2070 Пирдоп

<sup>2</sup> СМС-С ЕООД, 2070 Пирдоп

**РЕЗЮМЕ:** Дискутира се идея за приложение на петпроводна IT система (с изолирана неутрала) за електрическите мрежи в подземните и в откритите рудници. Анализират се нейните качества на фона на прилаганата трифазна (3P+PE) IT система с изолирана неутрала.

### POSSIBILITIES FOR APPLICATION OF FIVE-CONDUCTING SYSTEMS WITH INSULATED NEUTRAL (IT) IN MINES

Stefan Chobanov<sup>1</sup>, Mento Menteshhev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> СМС-С Electrical engineering

<sup>2</sup> СМС-С Electrical engineering

**ABSTRACT.** There is discussed an idea for implementation of five conducting IT system (with insulated neutral) for power networks in the underground mines and open pits. Its qualities are analyzed on the background of the applied three phase (3P+PE) IT system with insulated neutral.

Заземените системи TN-C 3P+PEN и TN-S 3P+N+PE позволяват да се включат потребители на линейно напрежение (основно триполюсни) и на фазно напрежение (еднофазни). Това техническо предимство е особено полезно в най-широко разпространените мрежи в Европа, с линейно напрежение 380V. Към тях удобно се присъединяват еднофазни консуматори с напрежение 220V (осветление, ръчни ел. инструменти, битова техника и др.).

Много съществено предимство на заземената (3P+N+PE) TN система е възможността да се осъществи чувствителна и селективна защита от токови утечки, както за трифазните, така и за еднофазните потребители.

Въпреки посочените предимства на системите със заземена неутрала и особено на петпроводната TN-S, те са тотално и категорично отречени (с малки изключения) за мините. В България тя е забранена за използване в подземните рудници [3, 5], а при определени условия се допуска в откритите рудници [4] и в геологопроучвателните обекти [6].

Основната причина са значителните по големина токове на утечка ( $10^0-10^1$ )A, лесно преминаващи в мощни еднофазни къси съединения ( $10^2$ A,  $10^3$ W). С много голяма вероятност ( $p \approx 1$ ) те надхвърлят в степени минималните токове, мощности и енергии, които могат да предизвикат експлозии на метановъздушна ( $5-15\%$  CH<sub>4</sub>) и праховъздушна (аерозолно -  $35-2000$ g/m<sup>3</sup>) във въглищните рудници ( $I_{min} = 10^{-2}$  A;  $W_{min} = 10^{-3}$  J) и пожари дори и в невзривопасни рудници ( $I_{m, min} = 10^{-1}$  A;  $P_{min} = 10^1$  W) [1,2].

Втора причина и съществен недостатък на заземените (TN и TT) системи е, че при еднополюсен директен допир (към фазен проводник), човек попада под напрежение близко или равна на фазното, което е безусловно опасно в използваните в мините трифазни мрежи 380, 500, 660, 1000, 1140V.

Това са основните мотиви, които определят еднозначният избор на IT системата с изолирана неутрала в подземните рудници [2,3,5] и макар нееднозначен, но предпочитан избор, в откритите рудници [4].

Коректно е да се отбележи, че системите с изолирана неутрала (IT) се прилагат и в геологопроучвателни обекти [6], а и в други съществено различаващи се условия като при електрообзавеждането на кораби, в хирургични зали и др. [10].

Съществено е да се подчертае, че в минната промишленост защитното изключване задължително се комбинира със защитното заземяване, като работата в режим на еднофазно з.с. в IT система е недопустима. Съображенията се базират на голямата вероятност да се осъществи директен еднополюсен или индиректен допир към линейното напрежение при докосване на една от здравните фази. В други отрасли, режимът на еднофазни з.с. е не само допустим, но се сочи като предимство на IT системата (спрямо TN), по отношение на надеждност, тъй като при е.з.с. потребителите продължават да работят нормално [7, 10].

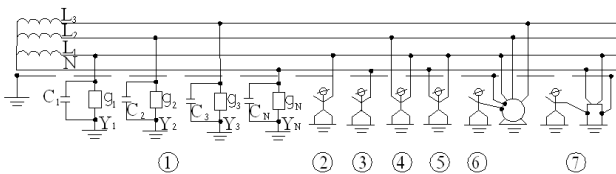
Не разполагаме с данни за приложение на петпроводната IT система (3P+N+PE) в подземните рудници. Използва се само трифазна 3P+PE система, с линейни напрежения 380; 500; 660; 1000; 1440V. При необходимост от по-ниски напрежения за осветление, сигнализация, ръчни електрически инструменти (127, 220V), се използват еднофазни или трифазни трансформатори със съответната пусково-предпазна апаратура.

През 2001г. в Асарел Медет АД е доставен напивообразовател VASP 1200 от фирма Voest Alpine обзаведен с петпроводна IT система – напрежения 380/220V със защитно изключване, предпазващо от индиректен допир [9]. Бързодействието на защита (6s), не отговаря на изискванията на БДС 10880-83, който ограничава собственото време на задействане до 0,1S, гарантирайки и защита от директен допир [8].

### Анализ на електробезопасността

Електробезопасните качества на петпроводната IT система с изолирана спрямо земята неутрала се анализират по схемата на фиг. 1 при следните възприети допускания и априорно възприети стойности и величини [1,2].

- Реалната мрежа се замества с еквивалентна схема, характеризираща се със съсредоточност и линейност на изолаторните проводимости и пренебрегване импеданса на тоководещите кабелни жила.
- Критерии за оценка са ефективните стойности на напреженията и тока.
- Съпротивлението на човешкото тяло е активно, линейното със стойност, в условията на подземните рудници,  $R_n=600\Omega$ .



Фиг.1

Напрежението на звездният център, съответно на N проводника  $\dot{U}_N$ , зависи от фазните напрежения  $U_1, U_2, U_3$  и проводимостите спрямо земята  $Y_1, Y_2, Y_3$  и  $Y_N$ . В общия случай

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N} \quad (1)$$

а ако  $|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2| = |\dot{U}_3| = U$ , при симетрия на напреженията

$$U_N = U \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N}, \quad (2)$$

а при симетрия и на проводимостите  $Y_i$   
 $U_N = 0$

При възникване на утечки в отделните фази, например във фаза  $L_1$ ,  $g_{y1}$ , напрежението на звездния център ще бъде:

$$\dot{U}_{Ny1} = \frac{\dot{U}_1(Y_1 + g_{y1}) + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_{y1}} \quad (3)$$

Тока на еднофазна утечка, отчитайки (3) е:

за  $L_1$

$$\dot{I}_{y1} = \dot{U}_{y1} g_{y1} = \left( \dot{U}_1 - \dot{U}_{Ny1} \right) g_{y1} = \left[ \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_1(Y_1 + g_{y1}) + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_{y1}} \right] g_{y1} \quad (4)$$

а при утечка в неутралния проводник N:

$$\dot{I}_{yN} = \dot{U}_N g_{yN}$$

При симетрия във фазните напрежения  $\dot{U}_i$  и проводимостите  $Y_i$  трите фази спрямо земята на напрежението на звездния център спрямо земята е 0, и токът на утечка от N проводника ще бъде 0.

$$I_{yN} = \dot{U}_N g_{yN} = 0 \quad (5)$$

Ако N проводника се заземява директно, т.е.  $g_{yN} \rightarrow \infty$ , системата се превръща в заземена, с всички произтичащи за нея, позитиви и негативи.

При възникване на утечки в две от фазите  $U_N \neq 0$

Например, ако в  $L_1$  и  $L_2$  възникнат утечки  $g_{y1}$  и  $g_{y2}$ , напрежението на звездния център ще бъде

$$\dot{U}_{Ny1,2} = \frac{\dot{U}_1(Y_1 + g_{y1}) + \dot{U}_2(Y_2 + g_{y2}) + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_{y1} + g_{y2}} \quad (6)$$

като токовете на утечки от двете фази ще бъдат:

$$\text{от } L_1 \quad \dot{I}'_{y1,2} = (U_1 - U_{Ny1,2}) g_{y1} \quad (7)$$

$$\text{от } L_2 \quad \dot{I}''_{y1,2} = (U_2 - U_{Ny1,2}) g_{y2} \quad (8)$$

и общо

$$\dot{I}_{y1,2} = \dot{I}'_{y1,2} + \dot{I}''_{y1,2} \quad (9)$$

Сравнявайки изразите за токовете на утечка, с тези отнасящи се за 3P+PE IT системата [1], се откроява влиянието на проводимостта на N проводника -  $Y_N$ .

Степента на това влияние зависи от отношението

$$\frac{Y_N}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + g_{yi}} \quad (10)$$

Важно е да се подчертае, че ток на утечка към земя от нулевия проводник е възможен при асиметрия в напреженията, независимо от причината, която ги е породила.

Токовете на утечка и мощността, която разсейват, са от съществено значение за инициране на експлозии и пожари. За различните случаи мощността се определя по уравнението

$$P_{yu} = \frac{|\dot{I}_{yi}|^2}{g_{yi}} \quad (11)$$

Пряката опасност за хората от токов удар възниква (фиг. 1) при директен еднополюсен 2, 3 при директен двуполусен допир 4,5, и при индиректен допир 6 и 7.

При директен еднополюсен допир до фазов проводник случай 2, човек попада под напрежение

$$\dot{U}_h = \dot{U}_1 - \dot{U}_N = \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_1(Y_1 + g_h) + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_h}, \quad (12)$$

а през него ще протече ток

$$\dot{I}_h = \dot{I}_h g_h = \left( \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_1(Y_1 + g_h) + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_h} \right) 1,67 \cdot 10^{-6}, mA \quad (13)$$

където, проводимостта на човека спрямо земя е приета

$$g_h = \frac{1}{R_h} = \frac{1}{600} = 1,67 \cdot 10^{-3} S$$

При директен еднополюсен допир към нулевия проводник N (случай 3) през човека ще протече ток, само при асиметрия в напреженията.

Ако асиметрията на напреженията спрямо земя е резултат на асиметрия в изолационното съпротивление, например еднофазна или двуфазна утечка токът през човека ще се определи

$$\dot{I}_h = U_N g_h = 1,67 \cdot 10^{-3} \dot{U}_N, A \quad (14)$$

където  $\dot{U}_N$  се определя, например по (3) или (6)

Освен при асиметрия в напрежението, N проводникът може да получи потенциал, при асиметричен товар в трифазна система. В този случай през N проводника протича ток

$$\dot{I}_N = \dot{I}_{1+} + \dot{I}_{2+} + \dot{I}_{3+} \neq 0 \quad (15)$$

а потенциала на нулевия проводник, зависи от отдалечеността  $L_x$  от звездния център.

$$\left| \Delta \dot{U}_N \right| = \left| \dot{I}_N \right| r_0 L_x \quad (16)$$

като може да достигне и опасни стойности  $>24V$

Токът през човека ще бъде

$$\dot{I}_h = 1,67 \cdot 10^{-3} \left| \dot{I}_N \right| r_0 L_x \cdot 10^3 = 1,67 \left| \dot{I}_N \right| r_0 L_x, mA \quad (17)$$

където  $r_0$  е съпротивление на кабела с дадено сечение при  $L_x=1m$ .

При двуполусен допир между двете фази 4, фиг.1, ситуацията е безусловно опасна, защото тока през човека се определя от линейно напрежение.

$$\dot{I}_h = U_{\Delta} \cdot g_h = 1,67 U_{\Delta}, mA \quad (18)$$

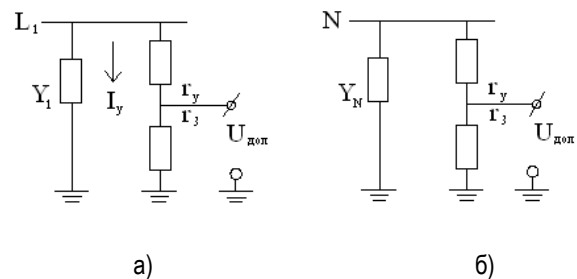
на пример при  $U_{\Delta} = 380V$ :  $\dot{I}_h = 635mA \gg I_{доп} = 25mA AC$

При допир към фазното напрежение (случай 5), опасността е не-по-малка.

$$\dot{I}_h = U_{\phi} g_h = 1,67 \cdot 10^{-6} U_{\phi} \quad (19)$$

при  $220V$   $\dot{I}_h = 1,67 \cdot 220 = 367,4mA \gg 25mA AC$

При индиректен допир, към корпус на трифазен консуматор (случай 6), напрежението на което попада човек се определя по заместващата схема (фиг. 2а), в която пробив в изолацията на двигателя е към фаза L1, през съпротивление  $r_y$ , а корпусът е заземен през съпротивление  $r_3$ . Съпротивлението на заземяване при изправна зазем. мрежа е  $r_3 \leq 2\Omega$ , но при прекъснатата верига на зазем. мрежа или недобра контактна връзка  $r_3 > 2\Omega$ . Ако връзката е прекъсната, остава съпротивлението на естественото заземяване на машината, при което е възможно  $r_3 \gg 2\Omega$ .



Фиг.2

### Допирно напрежение

$$\dot{U}_{доп} = \dot{I}_y r_3 = \left( \dot{U}_{1+} + \dot{U}_{N1} \right) g_e r_3 = \left( \dot{U}_{1+} + \dot{U}_{N1} \right) \frac{r_3 + r_y}{r_y} \quad (20)$$

където  $g_e$  да е еквивалентна проводимост на утечката в двигателя към земя  $\dot{I}_y$ :

$$g_e = \frac{r_3 + r_y}{r_3 r_y},$$

$$a \dot{U}_{N1} = \frac{\dot{U}_1(Y_1 + g_e) + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_e}$$

При индиректен допир към корпус на еднофазен консуматор (случая 7), напрежението на което попада човек, при утечка от  $L_i$  и с превключване на веригата на консуматора към N, се определя по зависимост аналогична на (20). Когато утечката е от N проводника и прекъсване към фазите ( $L_i$ ), допирното напрежение се определя по фиг. 2.б.

$$\dot{U}_{oon} = \dot{U}_N g_e r_3 \quad (21)$$

където:

$$g_e = \frac{r_3 + r_y}{r_3 r_y}$$

$$a \dot{U}_N = \frac{\dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_e} \quad (22)$$

е определен при симетрия в товарите, т.е.  $I_N \approx 0$

При значителна асиметрия в товарите ( $I_N \neq 0$ ). Напрежението на неутралния проводник се определя по

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N + g_e} + \left( \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \right) r_0 L_x \quad (23)$$

където  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  са токове в трифазните проводници  $L_1, L_2$  и  $L_3$ .

Получените зависимости за допирните напрежения към корпусите както при трифазните, така и при еднофазните консуматори, потвърждават минимален риск, когато са заземени ( $r_3 \ll 2\Omega$ ). Степента на риска при прекъснат PE проводник, когато се разчита на естественото заземяване на машините може да се отчете по получените по-горе зависимости (20)(21)(22)(23).

Общото заключение от анализа на електробезопасните качества на (3P+N+PE) IT система е, че те са съхранени спрямо масова използваната (3P+PE) IT мрежа със синусоидално напрежение.

Необходим е обаче анализ за мрежи съдържащи висши хармоници в напрежението и тока, аналогичен на изследването за (3P+PE) IT системи в [2]. Може да се прогнозира различия, от протичането на съставни хармоници кратни на 3 през N проводника, които отсъстват в трипроводната мрежа с изолирана неутрала [2].

Основните предимства на петпроводната (3P+N+PE) система с изолирана неутрала спрямо земя са:

А. В сравнение заземената (3P+N+PE) TN-S система

- Малки токове на утечка, лимитиращи малка мощност и енергия в режим на еднофазно земно съединение. Това гарантира значително по-малка вероятност за

възникване на експлозии в рудници опасни по газ и прах и за възникване на пожари;

- При еднополюсен допир на човек, токът през него се ограничава от изолационното състояние на мрежата. При достатъчно голямо съпротивление на изолацията на другите две фази, което се контролира, токът през човека може да има безопасни стойности (10-3 A);
- Малките токове на утечка предпоставят малки напрежения на корпусите на машините, при дефект в изолацията, т.е. малки напрежения при индиректен допир. Този ефект се гарантира в още по-голяма степен от изискването за максимално съпротивление на заземителната мрежа -  $2\Omega$  [3, 4,5].

Б. В сравнение изолираната (3P+PE) IT система

- Наличие на две напрежения линейно и фазно;
- Опростено присъединяване на релетата от утечки (към N, без трифазни филтри);
- Възможност за създаване на хибридна селективна защита от утечки от конвенционално реле, контролиращо изолационното съпротивление и използване на релета реагиращи на токовете с нулева последователност при асиметрия спрямо земя
- Отпадане на необходимостта от еднофазни трансформатори 220V (за осветление, ръчни инструменти и др.) в най-разпространените руднични мрежи в България с напрежение 380V. Това ще даде възможност за масово използване на голямото разнообразие на ръчни инструменти, което съществено ще облекчи работата на техн.персонал по експлоатацията на машините и съоръженията.

Недостатъците на петпроводната IT система (3P+N+PE) са:

В. В сравнение със заземената (3P+N+PE) TN-S система:

- Невъзможност за изграждане на защита от утечки със хоризонтална и вертикална селективност;
- Максималнотоковата защита не реагира на еднофазни земни съединения, но задължително трябва да бъде с три елемента

Г. В сравнение с изолираната (3P+PE) IT система:

- Проблеми граничещи с необходимост от 5-ти проводник в силовите кабели (за N проводниците) и произтичащите от това по-голямо тегло и цена
- Проблемите с неселективността на защитата от утечки се задълбочават с включването и на еднофазни консуматори в мрежата
- При неравномерно разпределение на еднофазните потребители към трите фази, е възможна несиметрия в напреженията

Практическите проблеми, които трябва да бъдат преодолени за въвеждането на петпроводната IT система в мините са свързани преди всичко с необходимостта от петжилни кабели със структура на сеченията  $3xS_1+2xS_2$ , където  $S_1$  са сечението на силовите жила, а  $S_2$  сечението на предпазния и нулевия проводник. Кабелите с такава

структура, подходящи за мините не се предлагат. Произвеждат се от типа  $3xS_1+1xS_2$ . По настоящем съществуват две алтернативни възможности.

- Използване на допълнителен едножилен кабел със сечение  $1xS_2$ . Измененията на Наредбата за устройство на електрическите уредби и електропроводни линии от 2007г. [7] допускат използването на допълнителен единичен проводник  $1xS_1$  като пети към произвежданите четирижилни кабели  $3xS_1+1xS_2$ .
- Използване на петжилен кабел с еднакво сечение на жилата  $-5S_1$ , определено от електрическия товар към него.

И двата варианта водят до нарастване на цената на кабела в сравнение с цената на кабел с конструкция  $3xS_1+2xS_2$ , каквито в момента не се произвеждат

Икономическата ефективност от приложението на петпроводната IT мрежа (3P+N+PE) 0,4kV трябва да се оцени чрез съпоставяне на спестените средства от трансформатори и агрегати за 220V и повишените разходи за кабели от необходимото допълнително жило.

Експертно, приблизително, изчисление за рудник с кабелна мрежа 1500m. и цената на кабелите 75 000лв., посъпването ще бъде с 14% - т.е. 10 500лв. При 7 трансформатора и агрегати за 220V – ще се спести инвестиция около 8400, към които би трябвало да се прибави спестена енергия от трансформация 380/220V, около 25000kWh годишно.

Към това почти равновесно съотношение на приходи и разходи, трябва да се прибавят значителните технически предимства: отпада инсталирането и поддръжката на т-ри 380/220V; във всички зони на рудника може да се ползва 220V за осветление, ръчни ел.инструменти, електрожени и т.н.; облекчава се труда на експлоатационния персонал и се съкращава времето за монтаж и ремонт, което има също парично измерение.

Анализираните качества на петпроводната IT система (3P+N+PE) позволяват да се направят следните основни изводи, валидни за мрежа 380/220V.

1. Системата притежава необходимите безопасни качества за прилагане в мините, без да нарушава изискванията на Правилниците по безопасност по отношение на електрическите уредби.

2. Съществено предимство е възможността да се използват две напрежения във всички зони на рудника, което дава многостранни удобства за експлоатационния персонал – облекчение на тежкия труд с масово прилагане на широк спектър конвенционални ръчни инструменти, източници на светлина, електрожени и др., машини за огъване минни лебедки и телфери и др.
3. Прогнозира се намаляване на продължителността на престойта за извършване на ремонтни дейности както в подготвителния така и в стадия на изпълнение.

Цялостната оценка за приложимостта на петпроводната IT система в мините изисква изследване на поведението и качествата и в мрежи съдържащи висши хармоници, чиито приложение нараства, на проблемите свързани с възможността за използване на селективни защиты, както и по-детайлна икономическа оценка. Това ще бъде обект на бъдещи анализи.

#### Литература:

- Данков Е. Електроснабдяване на минните предприятия. с.Техника, 1991.;
- Ментешев М. Безопасно използване на електрическата енергия и контрол на изолацията в рудничните електрически мрежи за ниско напрежение. Дис. за пол. н.ст.д.т.н. МГУ, София, 1986.;
- Правилник по безопасност на труда при разработване на въглищни находища по подземен начин, Техника, С., 1971;
- Правилник по безопасност на труда при разработване на полезни изкопаеми по открит начин. Техника, С., 1982;
- Правилник по безопасност на труда при разработване на рудни и нерудни находища по подземен начин. Техника, С., 1996
- Правилник по безопасност на труда при геологопроучвателни работи, Техника, С., 1996
- Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии, МЕ,С., 2004
- БДС 10880-83. Съоръжения електрически руднични. Апарати за защита от токовете на утечка за мрежи с напрежение до 1200V с изолиран звезден център. Технически изисквания и методи за изпитване.
- Въвеждане на защиты от утечки в мрежите 380 и 220V в електрическата уредба на Насипообразователя VASP 1200 "Асарел Медет". Архив СМС-С, 2002
- Hofheinz W.Protective Measures with Insulation Monitoring. VDE Verlag. Berlin, Offenbach, 2000

Препоръчана за публикуване от  
Редакционен съвет