

Ochrona przeciwporażeniowa w sieci o układzie zasilania IT

Electric shock protection in a network with an IT supply system

Układ zasilania IT znajduje zastosowanie w podziemiach kopalń, przemyśle chemicznym oraz wszędzie tam, gdzie wymaga się zwiększonej pewności zasilania z jednoczesną minimalizacją zagrożeń pożarowych. Jest stosowany na wszystkich jednostkach latających i pływających. Problematyka ochrony przeciwporażeniowej w układzie IT wymaga zrozumienia istoty stosowania oraz specyfiki pracy tego układu.

Słowa kluczowe: układ zasilania IT, ochrona przeciwporażeniowa

IT supply system finds use in mining undergrounds, chemical industry and in all places where increased supply safety is needed with a concurrent minimization of fire hazards. It is applied on all aircrafts and watercrafts. The issue of an electric shock protection with the use of the IT system requires understanding of application substance and specific nature of the system work.

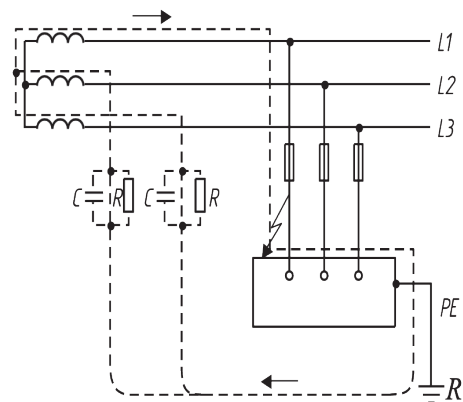
Keywords: IT supply system, electric shock protection

W układzie zasilania IT żadna część czynna nie jest uziemiona. Powoduje to, że układ ten charakteryzuje się najmniejszymi prądami zwarć doziemnych, jakie wystąpią w przypadku uszkodzenia izolacji podstawowej, spośród wszystkich układów zasilania nn. Dla pojedynczego zwarcia z ziemią prąd zwarciovzy zamyka się przez pojemności nieuszkodzonych przewodów fazowych względem ziemi oraz przewodu ochronnego PE, w obrębie galwanicznie połączonej sieci. Wartość prądu zwarciovzy nie zależy od miejsca wystąpienia doziemienia, lecz od konfiguracji sieci występującej w chwili wystąpienia zwarcia. Drogę przepływu prądu zwarciovzy dla pierwszego zwarcia przedstawia rysunek 1.

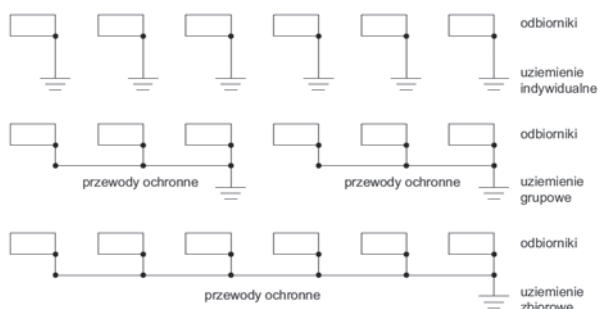
W układzie zasilania IT części przewodzące powinny być uziemione: indywidualnie, grupowo lub zbiorowo (rys. 2).

W układzie IT punkt neutralny transformatora zasilającego może zostać uziemiony przez impedancję o wartości 1-2 kΩ. Takie rozwiązanie jest stosowane w celu umożliwienia zwiększenia wartości prądów zwarciovzy oraz uniknięcia powstania oscylacji lub uniemożliwienia niekontrolowanego wzrostu napięcia w przewodach czynnych względem ziemi (rys. 3a). W przypadku zastosowania uziemienia w układzie zasilania IT, prąd zwarcia doziemnego musi pozostać na tyle mały, by nie pobudzić żadnego

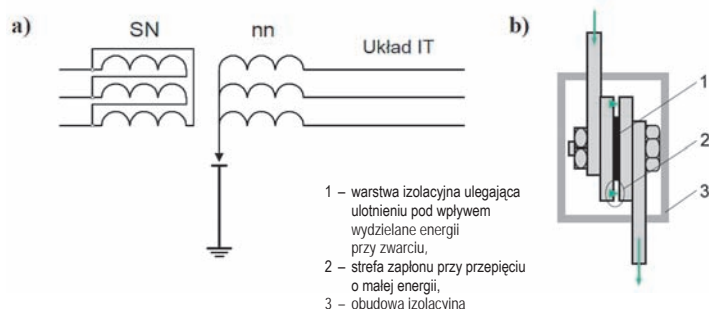
zabezpieczenia występującego w obwodzie zwarciovzy. Uziemienie takie wyposaża się w bezpiecznik iskiernikowy, którego budowę przedstawiono na rysunku 3b. W przypadku zasilania przez transformator SN/nn, bezpiecznik iskiernikowy ma zadanie ograniczenie prępeń, jakie mogą powstać w przypadku zwarcia pomiędzy uzwojeniami SN oraz nn.



Rys. 1. Prądy pojedynczego zwarcia pomiędzy przewodem fazowym uziemionym przewodem PE w układzie zasilania IT [4]

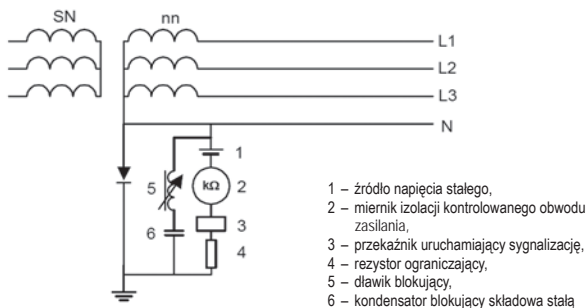


Rys. 2. Sposoby uziemienia części przewodzących dostępnych w układzie zasilania IT [4]



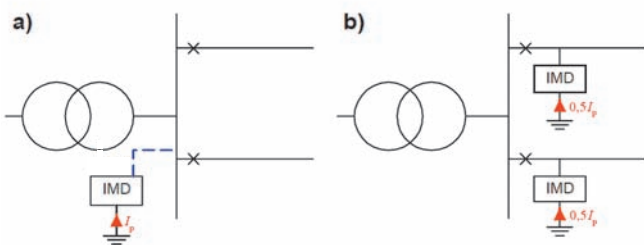
Rys. 3. Bezpiecznik iskiernikowy zainstalowany w sieci o układzie zasilania IT [1]
a) lokalizacja, b) budowa

Układ zasilania IT podczas zwarców gwarantuje, że energia wydzielana przez prądy zwarciorowe charakteryzuje się małą mocą. Skutkuje to minimalizacją zagrożeń pożarowych. Prąd pojedynczego zwarcia jest na tyle mały, że nie powoduje pobudzenia zabezpieczeń, przez co przy pojedynczym zwarciu zostaje zachowana ciągłość zasilania. Jednak w przypadku powstania drugiego zwarcia, w zależności od sposobu uziemienia odbiorników przyłączonych (rys. 2) do wspólnego źródła zasilania, układ ten samoczynnie przekształca się w układ zasilania TN lub układ TT. W celu uniknięcia zagrożeń, pierwsze zwarcie powinno zostać zasygnalizowane i szybko usunięte. W tym celu po stronie nn stosuje się Układ Kontroli Stanu Izolacji – UKSI (*ang.* IMD – *insulation monitoring devire*, czyli urządzenie do monitorowania stanu izolacji doziemnej), przyłączony w miejscu przedstawionym na rysunku 4.



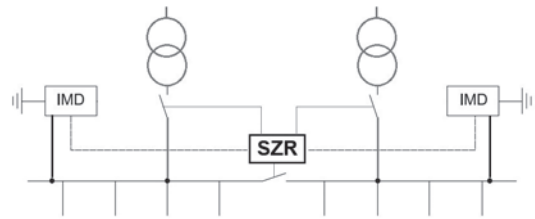
Rys. 4. Miejsce przyłączenia UKSI oraz jego główne elementy składowe [1]

Warunkiem poprawnych wskazań UKSI jest występowanie jednego układu w jednym układzie zasilania IT galwanicznie połączonym. Ponadto w przypadku układu zasilania zawierającego przekształtniki energoelektroniczne należy monitoringiem objąć układ wyjściowy przekształtnika oraz wszystkie przewody czynne przekształtnika. Na rysunku 5 został przedstawiony poprawny oraz niepoprawny układ zasilania wyposażony w UKSI. Na rysunku 5b zobrazowano przypadek, gdzie prąd pomiarowy dzieli się na dwa prądy o wartości równej połowie mierzonego prądu pomiarowego, co skutkuje błędnymi wskazaniami.



Rys. 5. Lokalizacja UKSI w układzie IT o dwóch liniach rozdzielczych [1]: a) poprawne, b) niepoprawne

Podobny problem występuje w przypadku sieci wyposażonej w układ automatyki SZR, zawierającej dwa transformatory zasilające (rys. 6). W takim przypadku każda sekcja musi posiadać własny UKSI z blokadą, tak by przy zasilaniu wszystkich odbiorników objąć kontrolą całość z jednego układu UKSI przyłączonego do transformatora zasilającego wszystkie odbiorniki.



Rys. 6. Układ uniemożliwiający przyłączenie dwóch UKSI przy zasilaniu całej sieci z jednego transformatora

W przypadku powstania pierwszego doziemienia prądy zwarciorowe są za małe do pobudzenia zabezpieczeń. Skutkuje to pozostawianiem pod napięciem części przewodzących uszkodzonego odbiornika. W celu zwiększenia ochrony należy w takim przypadku spełnić następujący warunek:

$$R_A \cdot I_d \leq U_L$$

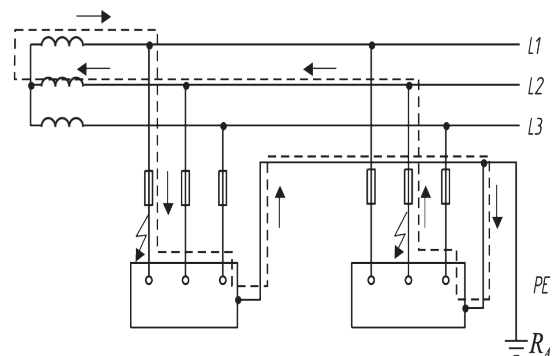
gdzie:

R_A – rezystancja uziemienia ochronnego, Ω ,

I_d – prąd zwarcia doziemnego, A,

U_L – napięcie dotykowe dopuszczalne w określonych warunkach środowiskowych, V.

Sytuacja diametralnie zmienia się przy podwójnym zwarceniu (rys. 7). Wówczas w zależności od sposobu uziemienia, układ zasilania przechodzi w układ zasilania TN lub TT. Wówczas powinno zadziałać jedno z zabezpieczeń występujących w obwodzie zwarcia.



Rys. 7. Obwód zwarcia przy w układzie zasilania IT przy dwumiejscowym doziemieniu [4]

W instalacji zasilającej N obwodów rozdzielczych lub odbiorczych, galwanicznie połączonych, liczbę kombinacji możliwych zwarc dwumiejscowych można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$C = \binom{N}{2} = \frac{N!}{2!(N-2)!}$$

W przypadku rozległych sieci możliwa do wystąpienia liczba zwarc dwumiejscowych jest bardzo duża i skutkuje dużymi trudnościami w ocenie wystąpienia najgorszych warunków, które należy rozpatrzyć na etapie projektowania. Przykładową pętlę zwarcia dwumiejscowego w rozległej sieci o układzie zasilania IT przedstawia rysunek 8.

Wymagane czasy samoczynnego wyłączenia zasilania zgodnie z wymaganiami normy PN-HD 60364-4-41 [2]

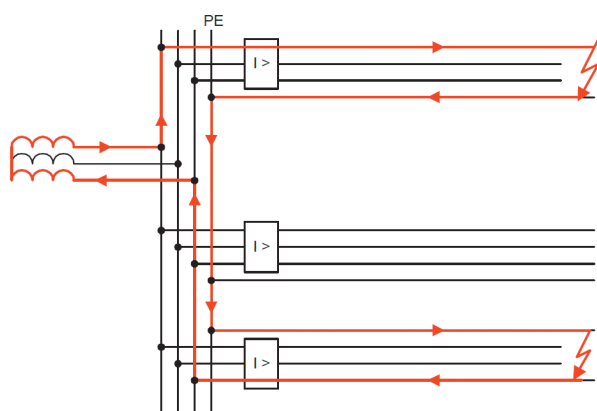
Układ sieci	50 V < U _o ≤ 120 V, w [s]		120 V < U _o ≤ 230 V, w [s]		230 V < U _o ≤ 400 V, w [s]		U _o > 400 V, w [s]	
	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc
TN	0,8	wyłączenie może być wymagane z innych przyczyn niż ochrona przeciwporażeniowa	0,4	5 [1]*	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3		0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

Objaśnienia: U_o – nominalne napięcie ac lub dc przewodu liniowego względem ziemi

*1) Wymaganie określone w normie PN-HD 60364-4-41: 2017-09 [3]

Zgodnie z wymaganiami normy PN-HD 60364-4-41: 2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym oraz jej nowszą wersją z 2017 roku [3], nie określa się wymagań w zakresie czasów samoczynnego wyłączenia w układzie zasilania IT (tab. 1).

Zadaniem projektanta jest określenie układu zasilania, w który przejdzie samoczynnie układ IT w przypadku wystąpienia podwójnego doziemienia.



Rys. 8. Przykładowa pętla zwarcia dwumiejscowego w sieci o układzie zasilania IT [1]

W celu uniknięcia trudności pojawiających się przy określaniu najgorszych spodziewanych warunków zwarciovych, jakie mogą wystąpić w rozległej sieci zasilającej o układzie zasilania IT, wprowadzono dwukrotne zaostrzenie warunku samoczynnego wyłączenia w układzie objętym zwarcim dwumiejscowym [2, 3]:

- dla obwodu bez przewodu neutralnego

$$Z_s = \frac{U_n}{2 \cdot I_a}$$

- dla obwodu z przewodem neutralnym

$$Z'_s = \frac{U_0}{2 \cdot I_a}$$

gdzie:

U_n – napięcie pomiędzy przewodami fazowymi [V],

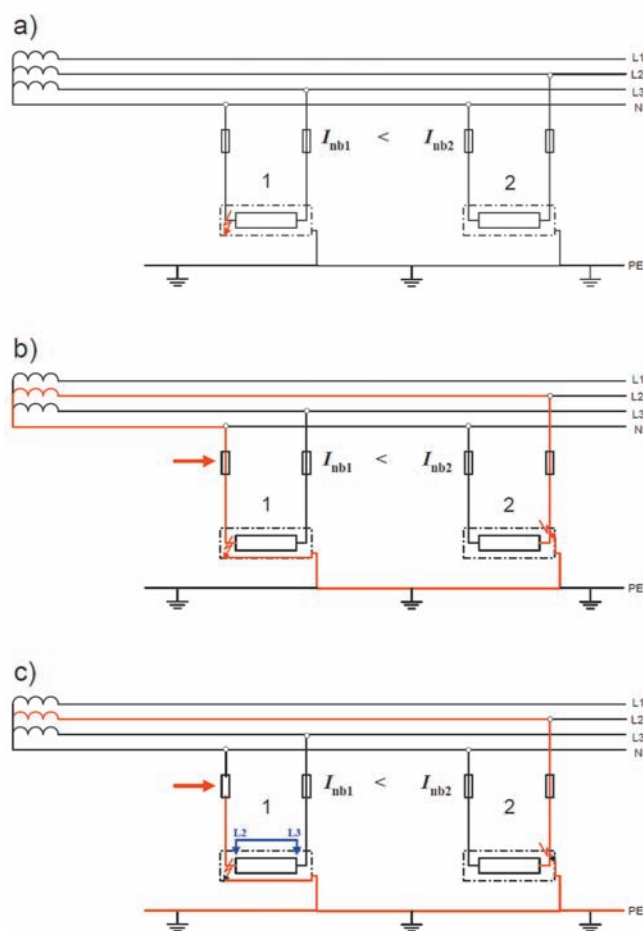
U₀ – napięcie pomiędzy przewodem fazowym a przewodem neutralnym [V],

Z_s – impedancja pętli zwarcia L-PE-L [Ω],

Z'_s – impedancja pętli zżarcia L-PE-N [Ω].

Przyjęcie takiego warunku gwarantuje, że co najmniej jedno z zabezpieczeń dokona samoczynnego wyłączenia w wymaganym czasie przy przepływie prądu o wartości nie mniejszej od prądu wyłaczającegogo zasilanie I_a w czasie określonym przez normę [2] oraz [3].

W układzie zasilania IT z przewodem neutralnym pojawiają się zagrożenia polegające na niepełnobięgunowym wyłączeniu zwarcia dwumiejscowego. Stan spowodowany niepełnobięgunowym wyłączeniem zwarcia dwumiejscowego w układzie zasilania IT z przewodem neutralnym przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Następstwa niepełnobięgunowego wyłączenia dwumiejscowego zwarcia w układzie zasilania IT z przewodem neutralnym [1]

a) zwarcie N-PE skutkujące małym prądem, nielokalizowane i nieusunięte,

b) zwarcie L2-PE w odbiorniku 2,

c) przepalenie wkładki bezpiecznikowej o mniejszym prądzie znamionowym w odbiorniku 1, który nadal pozostaje pod napięciem

W celu uniknięcia zagrożeń przedstawionych na rysunku 9 należy kontrolą realizowaną przez UKSI objąć także przewód neutralny oraz zabezpieczać przewód neutralny w taki sposób, aby przy wykryciu przeciążenia był on przerywany razem z przewodami fazowymi.

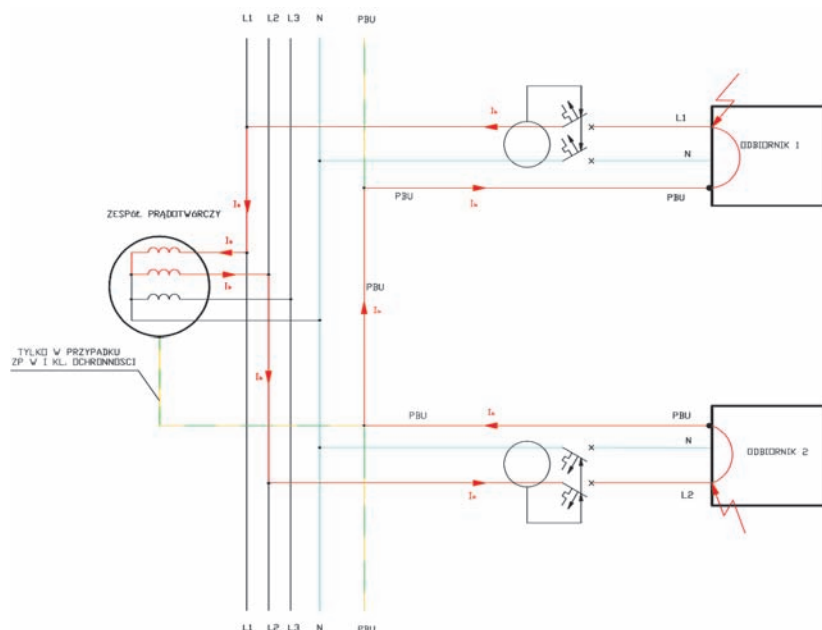
Zatem nie należy stosować w układzie zasilania IT z przewodem neutralnym bezpieczników topikowych. Należy stosować wyłączniki nadprądowe zapewniające pełnobięgunowe wyłączenie w przewodzie fazowym oraz przewodzie neutralnym. Pomocny może być wyłącznik różnicowoprądowy o znamionowym prądzie różnicowym nie większym od 20% dopuszczalnego prądu obciążenia długotrwałego przewodu neutralnego [1].

Na rysunku 10 został przedstawiony układ zasilania IT z wyłącznikami różnicowoprądowymi, gdzie przy wystąpieniu podwójnego doziemienia zostanie wyłączony jeden z uszkodzonych obwodów, pozostawiając drugi pod napięciem.

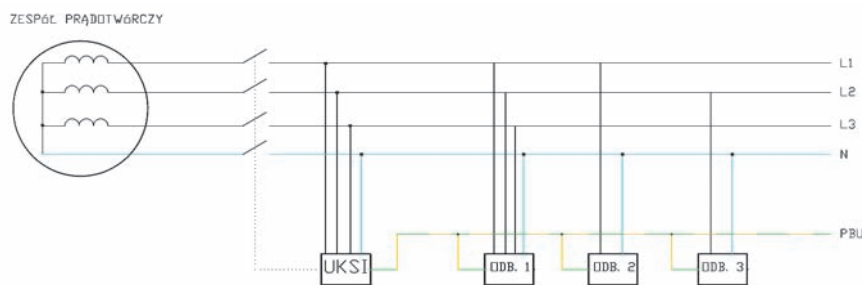
Układ zasilania IT znajduje zastosowanie w tymczasowych sieciach elektroenergetycznych rozwijanych przez jednostki ochrony przeciwpożarowej w czasie akcji ratowniczo-gaśniczych, gdzie używa się elektronarzędzi, dla których asymetria napięcia nie stanowi zagrożenia. Ze względu na ekstremalne warunki, jakim jest pożar oraz dynamikę rozwoju sytuacji, uzimianie zespołu prądotwórczego stanowiącego źródło zasilania byłoby rozwiązaniem niewłaściwym. Dlatego przy budowie tego typu sieci elektroenergetycznych należy wykorzystywać układ zasilania IU¹⁾ (I – części czynne izolowane, U – części przewodzące połączone z nieuziemionym przewodem wyrównawczym PBU), który nie wymaga uzimienia (rys. 11).

¹⁾ Spotyka się również określenia:

- separacja ochronna (obwodu wielu odbiorników) z urządzeniem UKSI działającym na wyłączenie,
- system przewodów wyrównawczych PBU z układem UKSI do monitorowania stanu izolacji.



Rys. 10. Obwód zwarcia przy podwójnym doziemieniu w układzie zasilania IT z wyłącznikami różnicowoprądowymi [11]



Rys. 11. Schemat polowej linii elektroenergetycznej wykonanej w układzie IU [11]

Układ ten nie jest objęty normalizacją krajową, a jego zastosowania nie są powszechne. Z uwagi na brak krajowych wymagań w tym zakresie, pomocne okazały się normy niemieckie:

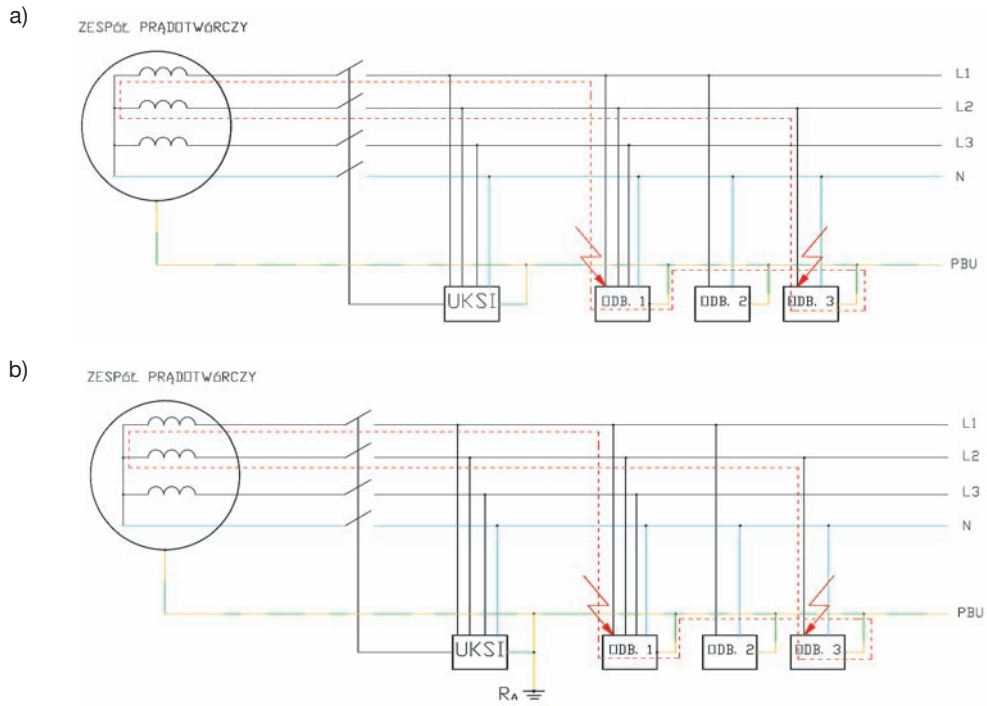
- DIN 14686:2010-05 Feuerwehrwesen-Schalt-schranke für fest eingebaute Stromerzeuger (Generatorsätze) ≥ 12 kVA für den Einsatz Feuerwehrfahrzeugen [6],
- DIN 14686:2007-02 Feuerwehrwesen-Fest eingebaute Stromerzeuger kleiner 12 kVA für den Einsatz Feuerwehrfahrzeugen [7].

Na rysunku 12 został przedstawiony obwód zwarcia przy podwójnym doziemieniu w układzie IT oraz układzie IU.

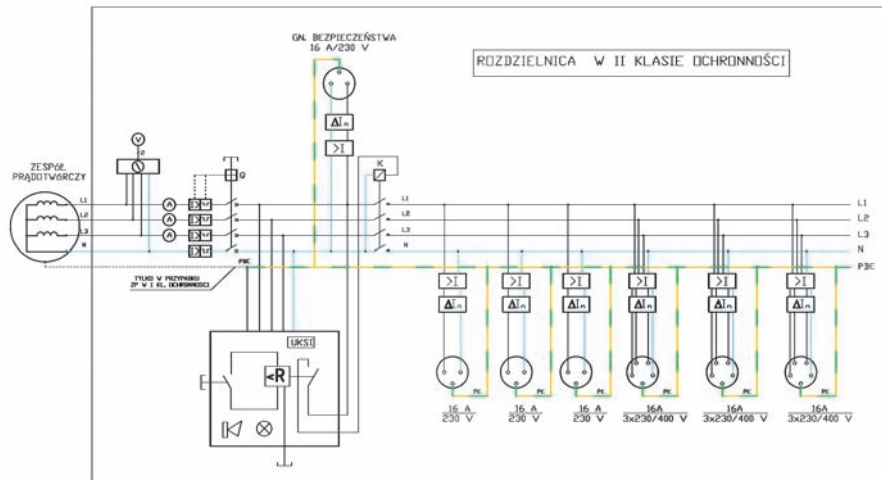
W układzie zasilania IU, podobnie jak w układzie zasilania IT, występuje Układ Kontroli Stanu Izolacji. UKSI²⁾ kontroluje stan izolacji całej instalacji tymczasowej i steruje podnapięciowym wyłącznikiem, który powoduje rozłączenie zasilania w przypadku zmniejszenia się rezystancji izolacji poniżej zadanego progu. Musi on posiadać dwustopniowe nastawienie:

- pierwszy próg – uruchamiający sygnalizację optyczną i akustyczną w przypadku uzyskania przez zasilaną sieć rezystancji izolacji o wartości $150 \Omega/V$, czyli pojawienia się prądów doziemnych o wartości około 6 mA; w przypadku działania sygnalizacji akustycznej może ona zostać wyłączona, podczas gdy sygnalizacja optyczna pozostaje nadal aktywna;
- drugi próg – powodujący odłączenie zasilania od zasilanej sieci polowej w przypadku uzyskania przez zasilaną sieć połową rezystancji izolacji o wartości $100 \Omega/V$, czyli pojawienia się prądów doziemnych o wartości 10 mA, które stanowią granicę samouwolnienia się w przypadku rażenia; w tym przypadku samoczynne wyłączenie zasilania powinno nastąpić w czasie nie dłuższym od 1 s.

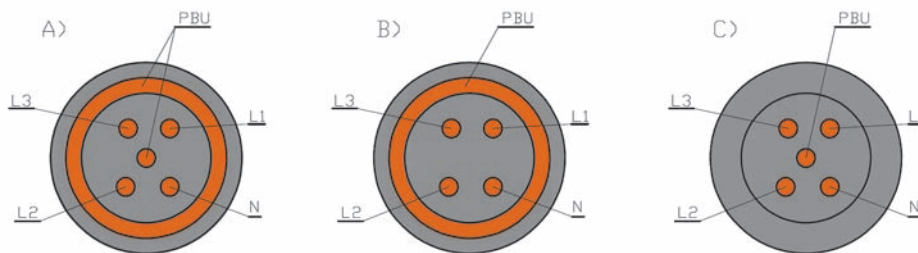
²⁾ Zgodnie z normą PN-HD 60364-7-704:2010P „Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 7-704. Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Instalacje na terenie budowy lub rozbiórki”, w zespołach prądotwórczych o mocy $S \leq 25$ kVA można nie instalować UKSI, z czego korzystają producenci zespołów prądotwórczych. W celu zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji UKSI należy instalować w rozdzielniczy stanowiącej element ukończenia instalacji tymczasowej, stanowiącej wyposażenie samochodów pożarniczych.



Rys. 12. Droga prądu zwarciovego w układzie zasilania IT (a) oraz układzie zasilania IU (b), przy podwójnym zwarciu [11]



Rys. 13. Przykładowy schemat zasilania instalacji tymczasowej rozwijanej podczas akcji ratowniczo-gaśniczej (UKSI musi gwarantować pomiar ciągłości przewodu PBU) [11]



Rys. 14. Przykład budowy przewodu stosowanego do budowy połowych sieci elektroenergetycznych stosowanych w jednostkach ochrony przeciwpożarowej [11]

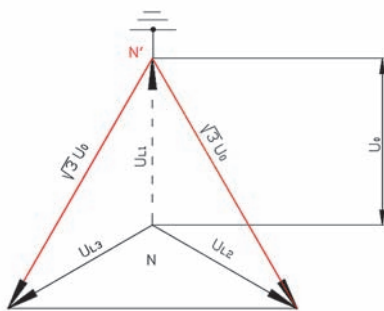
Na rysunku 13 przedstawiono przykładowy schemat zasilania instalacji tymczasowej budowanej w czasie akcji ratowniczo-gaśniczej zasilanej z generatora zespołu prądowłórczego w układzie zasilania IU.

Kable stanowiące element polowej sieci elektroenergetycznej (instalacji tymczasowej) rozwijanej w warunkach akcji ratowniczo-gaśniczej lub akcji ratowniczej powinny posiadać budowę co najmniej taką, jak przewody oponowe typu H07RN-F o napięciu $U_0/U = 450/750$ V, w których opona wykonana jest z niezapalnego kauczuku naeoprenowego, a żyły przewodzące są giętkie. Znacznie lepiej do tego celu nadają się przewody górnicze posiadające oponę olejoodporną i jednocześnie niepalną.

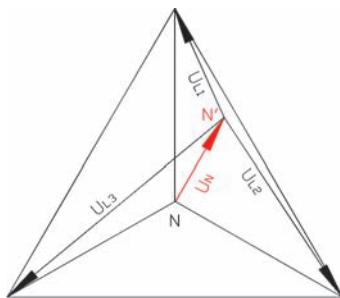
Z uwagi na przyjętą metodykę zasilania, zasadne wydaje się stosowanie przewodów spełniających przedstawione wymagania, ale wykonanych w taki sposób, aby opłot bezpośrednio pod powłoką zewnętrzną przewodu stanowił żyłę PBU.

Przykłady budowy przewodów możliwych do stosowania w instalacjach tymczasowych przedstawia rysunek 14. Najkorzystniejszą budowę ze względu na warunki eksploatacji posiada przewód przedstawiony na rysunku 14a, natomiast przewód przedstawiony na rysunku 8c jest powszechnie dostępny na rynku. Bardzo istotnym warunkiem zachowania bezpieczeństwa jest zakaz stosowania przewodów gołych jako przewodu PBU.

Mimo szeregu zalet układu zasilania IT oraz układu zasilania IU należy zwrócić uwagę, że nie nadają się one do zasilania wojskowych systemów dowodzenia rozwijanych w warunkach polowych ze względu na spodziewaną asymetrię napięć w poszczególnych fazach zasilających oraz brak możliwości zapewnienia symetrycznego obciążenia.



Rys. 15. Skutki doziemienia jednej z faz w układzie zasilania IT [11]



Rys. 16. Zobrazowanie zmienności napięć fazowych przy asymetrycznym zasilaniu w układzie IU – przykładowy rozkład wektorów napięć [11]

W układzie zasilania IT doziemienie jednej fazy skutkuje pojawianiem się na fazach nieuszkodzonych napięcia międzyfazowego, co symbolicznie przedstawia rysunek 15. Podobnie w układzie zasilania IU, w którym punktem odniesienia jest nieuziemiający przewód PBU. Będzie pojawiało się jednak napięcie U_N , którego wektor układał się będzie w zależności od asymetrii obciążenia poszczególnych faz. Skutkowało to będzie zmiennością wartości napięć fazowych, które w zależności od wartości napięcia U_N oraz położenia kąтового jego wektora, uzyskiwały będą różne wartości w stosunku do wartości znamionowych. Obrazuje to rysunek 16. W celu zapewnienia pełnego bezpieczeństwa, izolacja przyłączanych odbiorników do instalacji tymczasowej musi posiadać izolację odporną na zwiększone wartości napięcia do wartości napięcia międzyfazowego. Dla uniknięcia tego niekorzystnego zjawiska optymalnym jest stosowanie wyłącznie odbiorników trójfazowych symetrycznych.

Ponieważ w układzie IU przewód wyrównawczy PBU łączy wszystkie zasilane odbiorniki, przy podwójnym zwarciu, obwód zwarcia ładząco przypomina obwód zwarcia, jaki występuje w układzie zasilania TN. Stosunkowo łatwo można w tym przypadku spełnić warunek samoczynnego wyłączenia co najmniej w jednym obwodzie objętym zwarcie.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Musiał E., *Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach i instalacjach niskiego napięcia w świetle aktualnych przepisów i norm. Współdziałanie dwóch różnych układów, w tym TN i TT*, Materiały szkoleniowe P-KOIB.
- [2] PN-HD 60364-4-41: 2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
- [3] PN-HD 60364-4-41: 2017-09 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
- [4] Wiatr J., Orzechowski M., *Poradnik Projektanta Elektryka, Grupa Medium 2012, wydanie V*.
- [5] Wiatr J., *Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach i instalacjach niskiego napięcia, Materiały szkoleniowe MOIB*.
- [6] DIN 14686:2010-05 *Feuerwehrwesen-Schaltschränke für fest eingebaute Stromerzeuger (Generatorsätze) ≥ 12 kVA für den Einsatz Feuerwehrfahrzeugen*.
- [7] DIN 14686:2007-02 *Feuerwehrwesen-Fest eingebaute Stromerzeugerkleiner 12 kVA für den Einsatz Feurewehrfahrzeugen*.
- [8] Wiatr J., *Zespoły prądowłórcze w układach zasilania awaryjnego budynków*, DW Medium 2010.
- [9] PN-HD 60364-7-704: 2008 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 7-704. Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Instalacje na terenie budowy i rozbiorki.
- [10] DIN VDE 0701-0702: 2008-06 *Prüfung nach Instandsetzung, Änderung elektrischer Geräte Wiederholung sprüfung elektrischer Geräte*.
- [11] Wiatr J., *Elektryczne instalacje tymczasowe rozwijane przez jednostki ochrony przeciwpożarowej w czasie akcji ratowniczo-gaśniczej*, Materiały konferencyjne ELSAF 2017.

