

WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE SIECI IT ORAZ TT W ŚWIELE UŻYTKOWANIA W OKRĘTOWYCH SYSTEMACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

SELECTED ISSUES CONCERNING THE IT AND TT NETWORKS IN THE LIGHT OF USE IN MARINE ELECTRICITY SYSTEMS

Tomasz Nowak

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, e-mail: t.nowak@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: Artykuł jest próbą zwrócenia uwagi na zagadnienia właściwości technicznych przy eksploatacji podstawowych typów sieci elektroenergetycznych stosowanych na statkach. Celem jest porównanie ich pracy przy powszechnie występujących uszkodzeniach.

Słowa kluczowe: sieć elektroenergetyczna typu IT, TT, zwarcia, porównanie.

Abstract: This article is an attempt to pay attention to the technical characteristics of the operation of the basic types of electricity networks used on the ships. The aim is to compare their work in reference to commonly occurring failures.

Keywords: IT, TT power grid, short circuit, comparison.

1. WSTĘP

Powszechność stosowania na statkach elektroenergetycznych układów sieciowych typu IT przy możliwości stosowania układów alternatywnych (TT, TN) determinuje pytanie, dotyczące słuszności stosowania określonych rozwiązań na podstawie aktualnej wiedzy technicznej w zakresie zalet i wad dopuszczanych układów i ochrony przeciwporażeniowej. Wiedza na temat celowości zastosowania określonego rozwiązania może być pomocna w projektowaniu nowoczesnych okrętowych systemów elektroenergetycznych.

2. PODSTAWOWE UKŁADY ROZDZIAŁU ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA STATKU

Określenie konkretnego typu sieci elektroenergetycznej umożliwia posługiwanie się międzynarodowym kodem symbolicznym. Kod ten bazuje na oznakowaniu literowym różnych związków pomiędzy przewodami czynnymi, częściami przewodzącymi a ziemią.

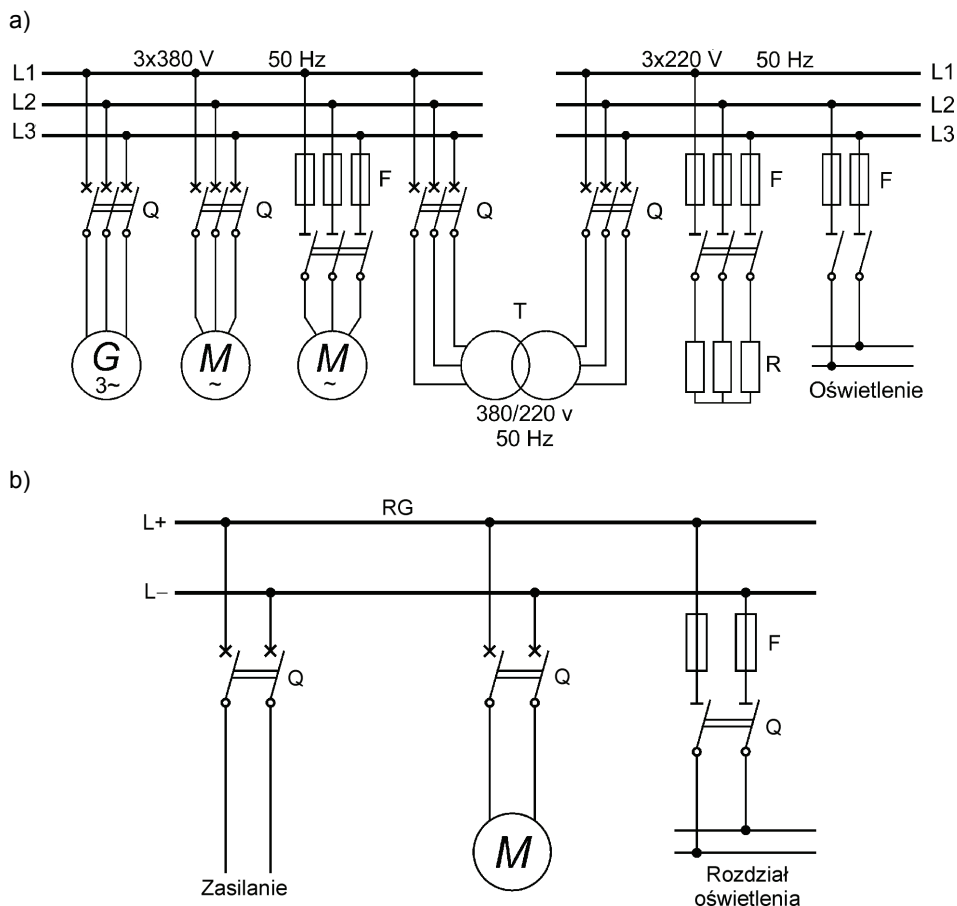
W użyciu występuje pięć rodzajów układów sieciowych: TNC, TNS, TNCS, TT, IT. Pierwsza litera określa sposób połączenia układu sieciowego tzw. uziemieniem roboczym: T – bezpośrednie połączenie z ziemią (najczęściej punktu neutralnego), I – brak połączenia z ziemią lub połączenie impedancyjne przeciwprzepięciowe. Druga litera określa połączenie części przewodzących dostępnych z przewodami uziemionymi: N – bezpośrednio z uziemionym punktem neutralnym, T – bezpośrednio z ziemią (kadłubem). Następne litery określają związek pomiędzy przewodem neutralnym a przewodem ochronnym: C – występuje jeden wspólny przewód ochronno-neutralny PEN, S – występują dwa osobne przewody: N – neutralny, PE – ochronny, CS – występuje hybryda PEN–N, PE [Mindykowski 2001].

Współczesny układ elektroenergetyczny na statku tworzy złożona struktura urządzeń, obejmująca swoim zasięgiem źródła, odbiory, system przesyłu i przetwarzania energii. W każdym takim układzie wyróżnia się części w różny sposób ze sobą powiązane. Zastosowanie odpowiedniego rozwiązania uziemienia roboczego (funkcjonalnego) determinuje typ zastosowanego układu sieciowego. Na statkach dla prądu stałego i prądu przemiennego dopuszczone są, odpowiednimi przepisami PRS (rozdział 4, t. VII) [NSEP-E-001:2003] i międzynarodowymi następujące systemy rozdzielcze niskiego napięcia: sieci dwużyłowe z jedną żyłą uziemioną (L1/N/PE); sieci jednożyłowe oparte na zasadzie przewodu powrotnego z kadłuba, tylko dla urządzeń lokalnych (np. rozruszniki silników spalinowych, antykorozyjne zabezpieczenia katodowe) (L1/PEN); sieci dwużyłowe izolowane od kadłuba (L1/L2/PE), sieci czterożyłowe z uziemieniem punktu neutralnego, (nie stosuje się zasady przewodu powrotnego z kadłuba) (L1/L2/L3/N/PE) = (sieć TN-S) lub (sieć TT); sieci trójżyłowe izolowane od kadłuba (L1/L2/L3/PE) = (sieć IT); sieci trójżyłowe z uziemieniem punktu neutralnego (nie stosuje się zasady przewodu powrotnego z kadłuba) (L1/L2/L3/PEN) = (sieć TN-S) lub (sieć TT); (nie są dozwolone dla obwodów końcowych (L1/L2/L3/PEN)).

W stanach znamionowej pracy oraz w stanach zakłóceń obejmujących tylko nieuziemione przewody czynne zastosowanie uziemienia funkcjonalnego nie wpływa na pracę układu elektroenergetycznego. Jednakże w przypadku zakłócenia doziemnego obecność uziemienia funkcjonalnego ma decydujący wpływ na działanie zabezpieczeń, tym samym na łatwość lokalizacji, detekcji, zastosowanych nastaw selektywności zadziałania zabezpieczeń, selektywności wyłączenia uszkodzonego obwodu oraz ma wpływ na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne sieci elektroenergetycznej. Te uwarunkowania w stosunku do układów okrętowych

schodzą na plan dalszy w kontekście gwarancji ciągłości zasilania danego obwodu elektrycznego. W tej sytuacji w praktyce najczęściej stosowane są następujące układy [Białek 2004; Kostyszyn i Nowak 2016]:

Układy: trójfazowy, trójprzewodowy izolowany prądu przemiennego i dwuprzewodowy izolowany prądu przemiennego lub stałego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Układy prądu: a) układ 3-fazowy, 3-przewodowy izolowany prądu przemiennego, b) układ dwuprzewodowy izolowany prądu stałego

Fig. 1. The grid networks: a) the 3-phase, 3-lines isolated grid network AC, b) the 2-lines isolated grid network DC

Układy te znalazły powszechne zastosowanie na jednostkach pływających głównie ze względu na:

- dużą dyspozycyjność układu, polegającą na pewności zasilania odbiorników nawet przy doziemieniu jednej fazy czy bieguna;

- zwiększone bezpieczeństwo pożarowe, pochodzące od prądu elektrycznego ze względu na małe wartości prądu doziemnego;
- zwiększone bezpieczeństwo porażeniowe, gdyż prąd rażenia w przypadku dotyku jednego bieguna lub fazy jest ograniczony impedancją izolacji pozostałych faz lub bieguna;
- ograniczenie dużych prądów zwarciovych przez elementy kadłuba;
- możliwości ciągłej kontroli rezystancji izolacji.
Do wad przedstawionych układów zalicza się:
 - możliwość pracy z doziemieniem jednej fazy;
 - brak wybiórczego wykrywania zwarć z kadłubem;
 - ewentualność powstania dużych przebiegów;
 - możliwość uszkodzenia urządzeń na skutek pojawienia się wzrostu napięcia.

3. RÓŻNE SPOSOBY UZIEMIENIA PUNKTU NEUTRALNEGO SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Zagadnienie sposobu uziemienia punktu neutralnego obejmuje problemy dotyczące sieci zarówno wyposażone, jak i pozbawione uziemienia funkcjonalnego.

W tabeli 1 przedstawiono różne sposoby uziemienia punktu neutralnego sieci elektroenergetycznych oraz niektóre skutki tego wyboru. Przedstawione sposoby rozwiązań mają wiele rozwiązań układowych różniących się wartościami parametrów impedancji włączonej między punktem neutralnym a uziomem. Skutkuje to, w przypadku mniejszej impedancji, wzrostem prądu zwarcia doziemnego, bez skrócenia czasu trwania zakłócenia z jednoczesnym zmniejszeniem przepięć ziemnozwarciowych [Musiał 2012].

Tabela 1. Różne sposoby uziemienia punktu neutralnego (PN) sieci

Table 1. Different ways of grounding the neutral point (PN) of the grid network

| Typ / info | PN izolowany | Sieć skompensowana | PN uziemiony przez rezystor | PN skutecznie uziemiony |
|---|--------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| ←———— Przepięcia | | | | |
| Ustalone | $k_E \approx \sqrt{3}^*$ | $k_E \approx \sqrt{3}$ | $k_E \approx \sqrt{3}$ | $k_E \leq 1,4$ |
| Przejściowe | 2,8...4,5 | 2,4...2,8 | 2,0...2,2 | 1,6...1,9 |
| Koszt uziemień i intensywność oddziaływań elektromagnetycznych —————> | | | | |

* Współczynnik zwarcia doziemnego k_E charakteryzuje liczbowo sposób uziemienia czyli stosunek najwyższego napięcia występującego między nieuszkodzoną fazą a ziemią w określonym miejscu sieci podczas zwarcia doziemnego do napięcia doziemnego w tym miejscu po ustąpieniu zwarcia.

W przypadku zastosowania układu sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi słuszna jest zależność:

$$I_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot \omega \cdot C \quad (1)$$

gdzie:

I_C – suma prądów pojemnościowych faz nieuszkodzonych,

U – międzyprzewodowe napięcie znamionowe,

f – częstotliwość (pulsacja $\omega = 2\pi f$),

C – pojemność doziemna jednej fazy.

W systemach lądowych to rozwiązanie znajduje zastosowanie w sieciach wydzielonych. Jednakże ze względu na narażenia przepięciowe szczególnie wrażliwej izolacji maszyn wirujących i przekształtników stosuje się różne środki zaradcze (uziemiaenie pośrednie wysokoimpedancyjne). Powoduje to zamieszanie terminologiczne dotyczące identyfikacji sieci, czy izolowanej, czy uziemionej impedancyjnie.

W przypadku zastosowania rozwiązania układu sieciowego, opartego na gaszącym dławiku kompensującym prąd ziemnozwarciowy (sieć skompensowana), występują warunki stałego dostrajania do rezonansu równoległego (indukcyjność dławika powinna samoczynnie równoważyć aktualną pojemność sieci).

$$I_L = \frac{U}{\sqrt{3}\omega L} \quad (2)$$

gdzie I_L – prąd płynący w przypadku zwarcia.

Teoretycznie zastosowanie dławika w przypadku rezonansu eliminuje prąd zwarciaowy. Nie jest to jednak z wielu powodów do końca możliwe i pożądane z uwagi na kompensowane składowe czynne, wyższe harmoniczne, uchyby nadążne wartości zadanej indukcyjności dławika. Zalecanym działaniem w przypadku użytkowania tego rodzaju sieci jest utrzymywanie określonego rozstrojenia kompensacji zależnego od rozległości sieci. Warunkiem wykorzystania zalet takiego typu sieci jest zastosowanie poprawnie dobranych zabezpieczeń [Musiał 2012].

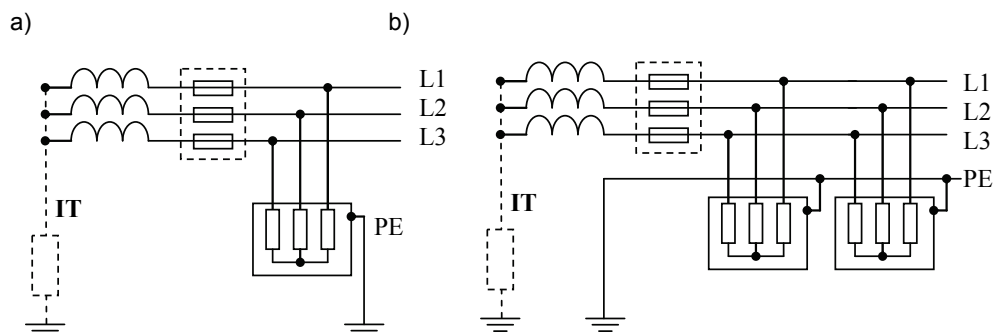
Ciągłe zastosowanie układu sieciowego z uziemionym punktem neutralnym przez rezystor szczególnie jest przydatne w sieciach kablowych, gdyż stanowi rozwiązanie pośrednie między układem z punktem izolowanym od ziemi a układem z punktem skutecznie uziemionym.

Pozwala ono dobrze chronić nieregenerującą się izolację przewodów poprzez skuteczne ograniczanie przepięć przejściowych. W przypadku zwarcia rezystor uziemiający wymusza określony przepływ prądu I_R będącego w fazie z napięciem fazowym w części uszkodzonej. W miejscu zwarcia prąd I_R dodaje się do pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego sieci I_C , który tu płynie, podobnie jak w sieci o izolowanym punkcie neutralnym. Tym samym za zabezpieczenia zwarciaowe mogą wystarczyć zabezpieczenia małopądowe.

W sieci o punkcie neutralnym izolowanym i w sieci skompensowanej wartość prądu ziemnozwarciowego praktycznie nie zależy od miejsca zwarcia. W sieci o punkcie neutralnym, uziemionym przez rezystor, prąd zwarcia w określonym miejscu sieci przyjmuje wartość zależną od miejsca zwarcia.

4. STANDARDOWA SIĘĆ OKRĘTOWA. SIĘĆ TYPU IT

Układ IT, którego strukturę przedstawiono na rysunku 2, a którego żadna część czynna nie jest uziemiona, charakteryzuje się najmniejszą wartością prądu zwarcia doziemnego I_d niezależnego od miejsca zwarcia. Prąd ten zamyka się przez upływności i przez pojemności nieuszkodzonych faz względem ziemi lub przewodu PE, gdy zostanie użyty w obszarze galwanicznie połączonej sieci wraz z odbiornikami [Białek 2004].



Rys. 2. Struktura układu sieciowego IT: a) z uziemieniem indywidualnym, b) z uziemieniem grupowym

Fig. 2. Structure of the IT grid network: a) with an individual grounding, b) with the group grounding

Układami typu IT są również sieci 230/400 V, w których występuje stałe lub dorywcze uziemienie części czynnych (punkt neutralny naturalny lub sztuczny) przez dużą impedancję, np. 1÷2 k Ω . Prąd I_d nie powinien przekraczać granicy wartości zadziałania zabezpieczeń nadprądowych. W układach z izolowanym punktem neutralnym stosuje się indywidualne, zbiorowe lub grupowe uziemienia dostępnych części przewodzących.

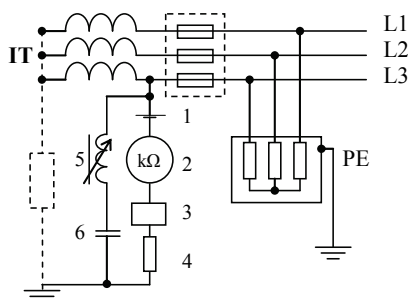
Podstawowym powodem zastosowania układu IT w instalacji sieci odbiorczej jest podwyższenie poziomu ufności ciągłości zasilania poprzez eliminację konieczności wyłączenia dominujących jednomiejscowych zwarc doziemnych (zwarc jednofazowych). Innym równie ważnym powodem zastosowania powyższego rozwiązania jest potrzeba ograniczenia zagrożenia wybuchowego bądź pożarowego (mała wartość prądu, mała moc cieplna).

Identyfikacyjnym elementem konstrukcyjnym sieci IT jest wyposażenie jej w przekaźnik upływnościowy (*Insulation Monitoring Device* IMD), monitorujący w sposób ciągły stan izolacji doziemnej. Umożliwia to ciągłą ocenę stanu technicznego sieci poprzez pomiar wypadkowej rezystancji izolacji względem potencjału ziemi wszystkich elementów czynnych [Musiał 2012].

4.1. Charakterystyczne stany pracy sieci IT

Pojedyncze uszkodzenie izolacji podstawowej, powinno zostać wykryte przez urządzenie monitorujące (rys. 3). Norma PN-EN 61557-8:2015 podaje wymagania, jakie powinno spełniać to urządzenie, określone m.in. przez dopuszczalną rezystancję doziemną 250Ω na jeden wolt napięcia znamionowego instalacji, ale nie mniej niż $15 \text{ k}\Omega$ [PN-EN 61557-8:2015].

Pojedyncze uszkodzenie powinno być szybko znajdowane, lokalizowane i naprawiane, aby nie nastąpiła eskalacja awarii do poziomu wieloprądowego, którego konsekwencją jest samoczynne wyłączenie zasilania. Z tego względu ten rodzaj sieci wymaga ciągłego nadzoru. W przypadku ograniczonych, autonomicznych systemów okrętowych z zatrudnionym przeszkolonym personelem warunek ten jest łatwo spełnić w odróżnieniu od publicznych sieci rozdzielczych lądowych.



Rys. 3. Główne elementy składowe urządzenia monitorującego stan izolacji doziemnej:
1 – źródło napięcia DC, 2 – indykator, 3 – przekaźnik, 4 – rezystor ograniczający,
5 – dławik nastawny, 6 – kondensator blokujący składową stałą

Fig. 3. Main components of the insulation monitoring device: 1 – DC voltage source,
2 – indicator, 3 – relay, 4 – limiting resistor, 5 – adjustable suppressor device,
6 – capacitor blocking DC component

Montaż określonego urządzenia monitorującego wymaga spełnienia szeregu parametrów wynikających z ograniczeń układowych. Należą do nich następujące warunki:

- w obszarze istnienia galwanicznie połączonego układu IT dozwolony jest montaż tylko jednego urządzenia kontrolnego stanu izolacji doziemnej;
- urządzenie należy podłączyć według instrukcji wytwórcy (standardowo do punktu neutralnego naturalnego lub sztucznego albo do określonego przewodu czynnego);

- doziemne pojemności układu IT nie powinny mieć wpływu na wskazanie miernika rezystancji izolacji poza krótkotrwałymi stanami przejściowymi;
- w przypadku zastosowania przewodu neutralnego N urządzenie musi obejmować monitoringiem również izolację doziemną tego przewodu;
- w przypadku stosowania w układzie IT urządzeń energoelektronicznych przekształtnikowych urządzenie monitorujące musi obejmować wszystkie wyjścia tych przekształtników.

Niestosowanie się do tych warunków stwarza sytuacje kłopotliwe czy wręcz niebezpieczne.

4.2. Uszkodzenie wielokrotne (dwumiejscowe) w sieci IT

W przypadku wielokrotnego (dwumiejscowego) zwarcia przez uziemienia indywidualne lub grupowe w sieci IT (standardowa sytuacja w sieciach okrętowych), gdy pętla zwarcia zamyka się przez kadłub (ziemię), występuje sytuacja identyczna jak w układzie TT przy pierwszym uszkodzeniu. Norma PN-HD 60364-4-41:2009 podaje sposób rozwiązania problemu bez odpowiedniego wyjaśnienia tylko dla instalacji prądu przemiennego ($I_a R_A \leq 50 \text{ V}$). Można na tej podstawie wysnuć wniosek, iż nie dopuszcza się stosowania sieci IT prądu stałego z uziemieniem indywidualnym lub grupowym oraz że do wyłączenia instalacji w sieci prądu przemiennego może być przydatny wyłącznik różnicowoprądowy [PN-HD 60364-4-41:2009].

Natomiast w wypadku, gdy zwarcie wielokrotne pojawi się w instalacji IT, w której zastosowano uziemienie zbiorowe (wspólne galwaniczne połączenie przewodem PE do wspólnego punktu uziomowego), wystąpi sytuacja, taka jak w układzie TN przy pierwszym uszkodzeniu, i wyłączenia powinny dokonywać zabezpieczenia nadprądowe. Impedancja pętli zwarcia w takim obwodzie powinna wynosić:

$$\text{bez przewodu N} \quad Z_s \leq \frac{U}{2I_a} \quad (3)$$

$$\text{z przewodem N} \quad Z'_s \leq \frac{U_0}{2I_a} \quad (4)$$

gdzie:

U – napięcie nominalne układu [V],

U_0 – napięcie między przewodem czynnym a przewodem neutralnym [V],

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

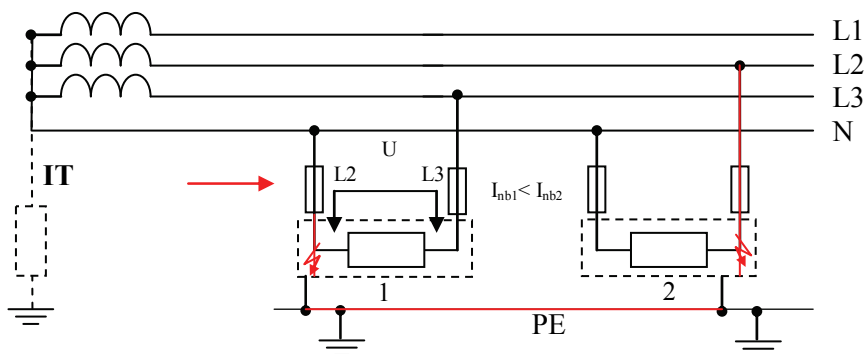
Z'_s – impedancja pętli zwarciowej L-PE-N [Ω],

I_a – prąd wyłączający [A].

4.3. Inne zagadnienia związane z siecią IT

Norma PN-HD 60364-4-43:2012 zaleca niestosowanie w sieci IT przewodu neutralnego. Zalecenie to ma na celu niedopuszczenie do sytuacji, w której w przypadku zwarcia wielokrotnego (dwumiejscowego) nie pojawiło się niebezpieczne napięcie międzyfazowe na nieprzystosowanym do niego odbiorniku. Spowodowałoby to jego uszkodzenie (rys. 4).

Jeżeli zaistnieje konieczność stosowania w układzie IT przewodu neutralnego, to można go zastosować pod warunkiem realizacji detekcji przeciążeń w obwodzie neutralnym wraz z przerywaniem tego obwodu w przypadku wystąpienia zakłócenia zwarciowego [PN-HD 60364-4-444:2012].



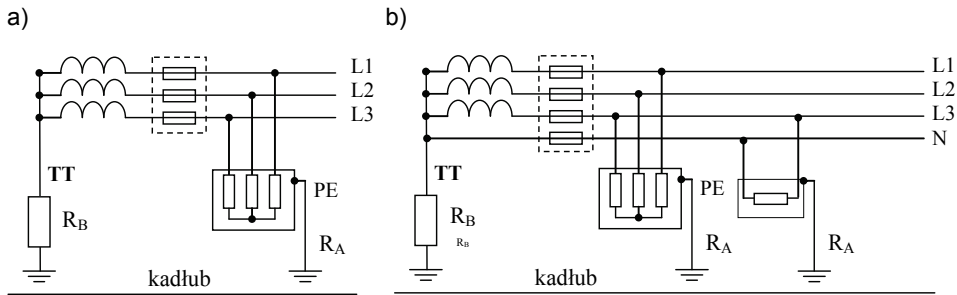
Rys. 4. Wyłączenie dwumiejscowego zwarcia w układzie IT z rozprowadzonym przewodem neutralnym

Fig. 4. Disconnection of the two-way short circuit in the IT system with a neutral line

W sytuacjach szczególnych wymaga się, aby urządzenie monitorujące stan izolacji było jednocześnie elementem zabezpieczającym, wyłączającym zasilanie przy wystąpieniu pierwszego uszkodzenia. Dopuszcza się w układach niestandardowych zastosowanie rozwiązań wyłączających całą instalację z wyjątkiem gniazd zasilania bezpieczeństwa (ciągłości zasilania). To rozwiązanie nie jest stosowane w okrętownictwie.

5. SIĘĆ OKRĘTOWA. SIĘĆ TYPU TT

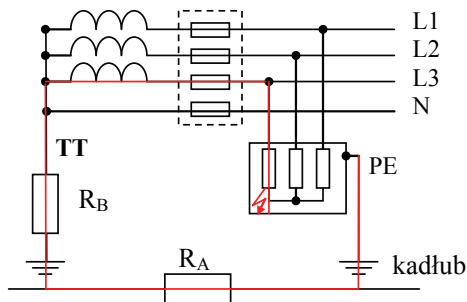
Struktura układu sieci typu TT zawiera bezpośrednio uziemiony punkt neutralny źródła zasilania bądź inną część czynną (rys. 5).



Rys. 5. Układ typu TT: a) bez przewodu neutralnego, b) z przewodem neutralnym

Fig. 5. Structure of the TT grid network: a) without neutral line, b) with neutral line

W przypadku uszkodzenia izolacji podstawowej w zasilanym obwodzie pętla zwarcia doziemnego zamyka się przez kadłub (ziemię) (rys. 6). Prąd znajduje drogę do ziemi przez uziemienie bądź zespół uziemień przewodu ochronnego, wraca przez uziemienie funkcjonalne do punktu neutralnego sieci (punkt neutralny generatora). W pętli zwarcieniowej znajduje się rezystancja uziemień i kadłuba. Na skutek tego całkowita pętla zwarcieniowa ma stosunkową dużą wartość, przez co prąd zwarciový jest mały, praktycznie niedostępny do ograniczenia przez klasyczne zabezpieczenia bezpiecznikowe i łącznikowe (wyłączniki nadprądowe) w dopuszczalnym czasie trwania zwarcia, wynoszącym 0,5 s.



Rys. 6. Uszkodzenie izolacji podstawowej w układzie TT

Fig. 6. Failure of primary insulation in the TT grid network

Pewnym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie do samoczynnego wyłączenia zasilania w tych instalacjach wyłączników różnicowoprądowych (RCD). Niestety, łączniki te cechuje duży współczynnik zawadności, skąd wynika problem rezerwowania zabezpieczenia. Można to zrealizować poprzez wyłączniki RCD selektywne. W tym momencie ogranicza się pole możliwości technicznych zabezpieczenia układu przy ochronie dodatkowej [Musiał 2012]. W systemach okrętowych wyłączniki RCD nie są raczej stosowane.

W przypadku uszkodzenia izolacji w sieci TT napięcie dotykowe względem ziemi wynosi:

$$U_T = U_0 \frac{R_A}{R_A + R_B} \quad (5)$$

gdzie:

- U_0 – napięcie układu względem kadłuba,
- R_A – rezystancja uziemienia przewodu ochronnego i kadłuba,
- R_B – rezystancja uziemienia funkcjonalnego.

Tu objawia się inna zasadnicza wada układu TT. Jest nią stosunkowo duża rezystancja uziemienia funkcjonalnego (na statkach przy metalowym kadłubie problem jest mniejszy). Powoduje to istnienie napięcia dotykowego prawie równego napięciu układu do momentu zadziałania zabezpieczenia. Z tego powodu norma PN-HD 60364-4-43:2012 wymusza krótki czas działania zabezpieczeń (0,07 s dla U od 230 V do 400 VAC) [PN-HD 60364-4-43:2012].

Norma różnicuje kryteria skuteczności ochrony przez samoczynne wyłączenie zasilania w układzie TT. Jeżeli wyłączenie następuje za pomocą wyłącznika ΔI , to obowiązują zależność:

$$R_A \leq \frac{50}{I_{\Delta n}} \quad (6)$$

Jeżeli wyłączenie następuje na skutek zadziałania zabezpieczenia nadprądowego (o prądzie wyłączającym I_a , to obowiązują zależność:

$$Z_S \leq \frac{U_0}{I_a} \quad (7)$$

Zważywszy, że rezystancja uziemienia funkcjonalnego sieci RB jest zwykle wielokrotnie mniejsza niż rezystancja uziemienia przewodu ochronnego R_A , na ogół uprawniona jest zależność $Z_S \approx R_A$ [PN-HD 60364-4-41:2009].

Jednakże poprzez możliwość wykorzystania metalowego kadłuba statku jako uziemienia (stosunkowo dobra wartość rezystancji uziemienia) możliwe jest zastosowanie samoczynnego wyłączenia zasilania poprzez zabezpieczenia nadprądowe, gdyż załoga znajduje się w strefie przewodzącej jak przy zastosowaniu połączeń wyrównawczych, tym samym narażona jest na działanie napięcia między częściami jednocześnie dostępnymi. Jest ono równe spadkowi napięcia, jaki prąd zwarcia doziemnego wywołuje na określonym odcinku uziemienia.

Inną wadą układu TT jest możliwość stosowania w nim tylko jednego uziemienia funkcjonalnego u źródła zasilania. Ta konfiguracja w przypadku wyprowadzonego przewodu neutralnego N w sytuacji naruszenia jego ciągłości wywołuje niebezpieczną niesymetrię napięć fazowych (w układach TN niesymetrię

łagodzą dodatkowe uziemienia przewodu PE). Wymaga to zastosowania specjalnych łączników, w których rozłączane są izolacyjnie wszystkie przewody czynne, również przewód neutralny N. W obwodzie 3-fazowym 4-przewodowym konieczny jest więc łącznik izolacyjny 4-biegunowy o opóźnionym otwieraniu i przyspieszonym zamykaniu zestyku w biegunie neutralnym N, chyba że łącznik gwarantuje migowe jednoczesne zamykanie i otwieranie wszystkich biegunów.

6. ASPEKTY ANALIZY PORÓWNAWCZEJ UKŁADÓW SIECIOWYCH IT, TT ORAZ MOŻLIWA GALWANICZNA WSPÓŁPRACA MIĘDZYUKŁADOWA

Przepisy PRS dopuszczają stosowanie w ograniczonej formie układów sieciowych typu TN. Jednakże znikoma praktyka ich zastosowania sprawiła, iż w analizie porównawczej zostaną pominięte.

Prawidłowo wykonana sieć elektroenergetyczna danego rodzaju na napięcie międzyprzewodowe 400 V posiada charakterystyczne parametry pozwalające na jednoznaczną identyfikację na podstawie pomiaru impedancji pętli zwarcia bądź pomiaru prądu zwarcia doziemnego (tab. 2).

Tabela 2. Cechy identyfikacyjne sieci TT i IT

Table 2. Identification features in the TT and IT grid networks

| Układ sieci | IT | TT |
|-------------------------------|---------|--------------|
| Prąd zwarcia doziemnego | < 2 A | Od 5 do 50 A |
| Impedancja pętli zwarcia L-PE | > 200 Ω | Od 5 do 50 Ω |

Na podstawie cech różnych systemów sieci elektrycznych dokonano próby porównania przydatności tych sieci w związku z dominacją określonych parametrów technicznych. Porównanie oparto na systemie ocen szkolnych od 1 do 6, przy czym szóstka oznacza doskonałą cechę systemu dostosowaną do podanego kryterium, natomiast jedynka oznacza sytuację odwrotną. Piątka jest oceną bardzo dobrą, czwórka dobrą, trójka dostateczną, a dwójka dopuszczającą): **łatwość wprowadzenia** (IT 2, TT 4), **łatwość rozbudowy** (IT 3, TT 5), **koszt inwestycyjny** (IT 3, TT 3), **ciągłości zasilania** (IT 5, TT 3), **skuteczności ochrony od porażień** (IT 5, TT 5), **skuteczność ochrony od pożarów** (IT 5, TT 4), **odporność na przepięcia** (IT 2, TT 4), **kompatybilność elektromagnetyczna** (IT 4, TT 4). Na tej podstawie można stwierdzić iż, układ IT jest skuteczniejszy, biorąc pod uwagę ciągłość zasilania i skuteczność ochrony od pożarów. Natomiast układ TT wygrywa w kategorii łatwości rozbudowy i wprowadzenia. Układ sieci IT nadaje się więc do instalacji specjalnych pozostających pod stałym nadzorem, jeśli ważna jest ciągłość zasilania mimo wystąpienia pierwszego uszkodzenia i ze

względem zagrożenia pożarowe (mała moc cieplna wydzielana w miejscu uszkodzenia). Układ TT należy traktować jako alternatywę w przypadku rozpatrywania trwałości izolacji w kablach wysokiego napięcia poddanej działaniu przepięć [Musiał 2012].

W systemach okrętowych występuje problem koordynacji sieciowej w przypadku zasilania statku w porcie z przyłącza lądowego. Oznacza to konieczność sprostania szczególnie dużej różnorodności cech i parametrów różnych instalacji. Chodzi zatem o to, czy i pod jakimi warunkami mogą współdziałać dwa układy wybrane spośród następujących: IT, TT, TN-C, TN-S, które – poza sposobem powiązania z ziemią – niczym się nie różnią przy dopasowaniu napięciowym i częstotliwościowym. W razie zastosowania połączenia z oddzieleniem galwanicznym nie występują żadne ograniczenia układowe. W sytuacji połączenia galwanicznego w systemie okrętowym możliwa byłaby do zastosowania wyspa TT w sieci TN. Można to zrealizować na podstawie zapisu normy PN-HD 60364-4-41:2009. W arkuszu 41 napisano: „Jeżeli urządzenie ochronne różnicowoprądowe jest stosowane do samoczynnego wyłączenia zasilania obwodu poza strefą objętą połączeniami wyrównawczymi głównymi, to części przewodzące dostępne nie muszą być przyłączone do przewodów ochronnych układu TN pod warunkiem, że są przyłączone do uziomu, mającego rezystancję dostosowaną do prądu wyzwalającego urządzenia ochronnego różnicowoprądowego. Obwód zabezpieczony w ten sposób jest zaliczany do układu TT” [PN-HD 60364-4-41:2009].

Wyspa TT w sieci TN powstaje w ten sposób, że w instalacji zasilanego obiektu w żaden sposób nie wykorzystuje się przewodu ochronnego PE zasilającej sieci TN bądź funkcji ochronnej przewodu PEN tej sieci. W złączu instalacji od przewodu PEN odgałęzia się tylko przewód neutralny N. Wobec tego w razie uszkodzenia prąd zwarciovowy płynie w obwodzie ziemnopowrotnym, jak w układzie TT poprzez rezystancję R_A – uziemienie ochronne instalacji i R_B sumę rezystancji uziemień ochronno-funkcjonalnych układu TN.

7. PODSUMOWANIE

Dopuszczone przepisami klasyfikacji i budowy statków morskich sieci IT dominują w układach sieciowych okrętowych. W odróżnieniu od statków budowanych w Polsce, w wielu krajach, zwłaszcza zachodnich, stosuje się również drugi dopuszczalny system energetyczny. System ten występuje szczególnie często na niedużych statkach o tonażu w granicach kilku tysięcy ton brutto. Niewątpliwą zaletą układu sieci z izolowanym punktem neutralnym jest możliwość ciągłego monitorowania stanu izolacji w sieci. Niski stan izolacji wywołuje alarm. Odpowiednio wczesne wykrycie i usunięcie doziemienia w instalacji elektrycznej zapobiega niebezpieczeństwu porażenia czy też pożaru. System rozdziału energii z uziemionym punktem neutralnym nie daje możliwości działania urządzeń IMD. Każde doziemienie powoduje wystąpienie znacznych prądów i tylko od stanu

instalacji ochronnej oraz niezawodności zabezpieczeń zależy skuteczna ochrona przeciwporażeniowa. Jak widać, w obu przypadkach znaczenie ma stan instalacji ochronnych, niepozwalających na powstanie niebezpiecznego potencjału na obudowie, jak również stan zabezpieczeń zapewniających wyłączenie zwarcia w odpowiednio krótkim czasie. Wyższość systemu IT, chronionego instalacją uziemiającą, wyraża się we wczesnym ostrzeganiu oraz w fakcie, iż zwarcie jednej fazy z elementami uziemionymi nie powinno wywołać zbyt wysokiego niebezpiecznego dla człowieka potencjału. Ma to znaczenie na statku stalowym.

Ciągły rozwój elektrycznych systemów okrętowych, wzrost mocy zainstalowanej, stosowanie wysokich napięć, ograniczanie dużych prądów zwarciovych skłania do dyskusji na temat różnych dopuszczalnych rozwiązań technicznych, w tym sieciowych. Wydaje się, iż dominacja systemów IT w okrętownictwie jest niezagrażona. Jednakże nowe wyzwania, jak np. odporność na przepięcia w systemach wysokonapięciowych, skłaniają do rozpatrywania możliwości zastosowania alternatywnych rozwiązań, np. układu sieciowego TT.

LITERATURA

- Białek, R., 2004, *Elektrotechnika i elektronika okrętowa*, FRAM Gdynia.
- Kostyszyn, R., Nowak, T., 2016, *Elektroenergetyka okrętowa*, Wydawnictwo AM w Gdyni, Gdynia.
- Mindykowski, J., 2001, *Ocena jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych z układami przekształtnikowymi*, OiŻ, Gdańsk.
- Musiał, E., 2012, *Ochrona od porażen w instalacjach niskiego napięcia w świetle aktualnych przepisów i norm. Współdziałanie dwóch różnych układów, w tym TT i TN*, Pomorsko-Kujawska Izba Inżynierów Budownictwa, Bydgoszcz – Toruń – Włocławek, 26–27 listopada 2012.
- N SEP-E-001:2003, *Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przeciwporażeniowa*.
- PN-E-05009-41:1992, *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona zapewniająca bezpieczeństwo. Ochrona przeciwporażeniowa*.
- PN-HD 60364-4-41:2009, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym*.
- PN-HD 60364-1:2010, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 1: Wymagania podstawowe, ustalenie ogólnych charakterystyk, definicje*.
- PN-HD 60364-4-43:2012, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-43: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed prądem przetężeniowym*.
- PN-HD 60364-4-444:2012, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-444: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed zakłóceniami napięciowymi i zaburzeniami elektromagnetycznymi*.
- PN-EN 61557-8:2015-03E, *Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemiennych do 1 kV i stałych do 1,5 kV – Część 8: Urządzenia do monitorowania stanu izolacji w sieciach IT*.
- PRS, 2017, *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich. Instalacje elektryczne i systemy sterowania*, cz. VII, Gdańsk.