
Kable i przewody (nn, SN, WN)
Projektowanie ochrony przeciwporażeniowej
w instalacjach elektrycznych nn zasilanych z
generatora zespołu prądotwórczego lub UPS

mgr inż. Julian Wiatr

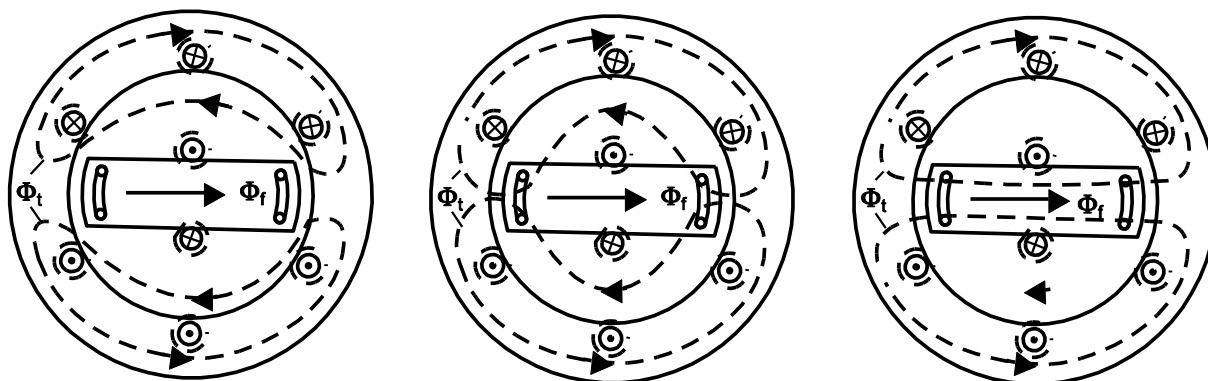
Wstęp

W artykule przedstawiono odmienną pracę generatora zespołu prądowłórczego w stanie zwarcia, funkcjonującego jako źródło zasilania awaryjnego obiektu budowlanego w stosunku do transformatora elektroenergetycznego przyłączonego do Systemu Elektroenergetycznego. Określono zasady obliczania prądów zwarć jednofazowych niezbędnych do oceny ochrony przeciwporażeniowej realizowanej przez samoczynne wyłączenie. Zaprezentowano metodę projektowania ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych, gdzie uzyskanie samoczynnego wyłączenia w czasie określonym przez normę PN-HD 60364-4-41: 2009, jest niemożliwe do uzyskania.

Zasilanie ze źródeł awaryjnych (zespołów prądowłórczych)

Zespół prądowłórczy w stosunku do systemu elektroenergetycznego jest źródłem „miękkim”, w którym impedancja obwodu zwarciovego ulega szybkiej zmianie w czasie zwarcia (przyjmuje się, że system elektroenergetyczny charakteryzuje się stałą impedancją obwodu zwarciovego z uwagi na dużą wartość mocy zwarciovowej).

W chwili wystąpienia zwarcia ulega zmianie rozpył strumieni magnetycznych w generatorze zespołu prądowłórczego. Rozpyły strumieni w generatorze podczas zwarcia przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przebieg wypychanego poza wirnik strumienia stojana: a) stan podprzejściowy, b) stan przejściowy, c) stan ustalony.

W początkowej fazie zwarcia nazywanej stanem podprzejściowym, w skutek działania klatki tłumiącej, strumień główny wytwarzany przez prądy płynące w uzwojeniu stojana jest wypychany poza wirnik (rys. 1a). W stanie tym reaktancja generatora charakteryzuje się małą wartością, wynoszącą przeciętnie (10 – 15)% wartości znamionowej reaktancji generatora.

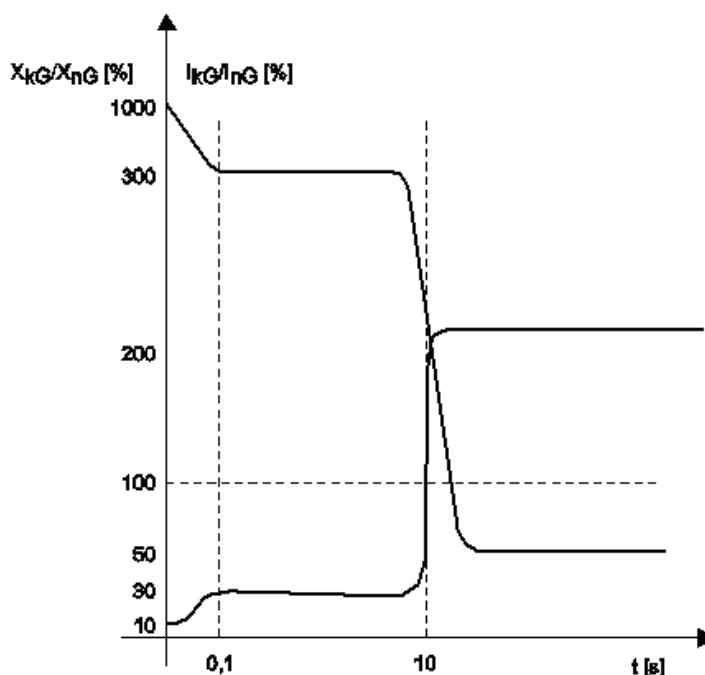
Stan ten trwa bardzo krótko ze względu na małą wartość elektromagnetycznej stałej czasowej T , wynoszącej dla generatorów nn, średnio 0,01 s.

Działanie klatki tłumiącej ze względu na małą wartość jej rezystancji szybko ustaje, co skutkuje powolnym wchodzeniem strumienia głównego w wirnik. Stan ten nazywany stanem przejściowy charakteryzuje wzrost reaktancji generatora, która dla generatorów nn wynosi średnio (30- 40)% wartości reaktancji znamionowej generatora (rys.1b).

Generator w krótkim czasie przechodzi w stan ustalony zwarcia, co objawia się dalszym wzrostem reaktancji obwodu zwarciovego. W stanie ustalonym zwarcia strumień główny oraz strumień wzbudzenia zamykają się w przez wirnik generatora. Ponieważ kierunki tych strumieni są przeciwne, strumień wypadkowy ulega sinemu zmniejszeniu (rys.1c). Zjawisko to prowadzi do gwałtownego wzrostu reaktancji generatora, która dla generatorów nn wynosi (200 – 300)% wartości znamionowej reaktancji generatora.

W zespołach prądowłórczych konstruowanych obecnie, instalowany jest regulator prądu wzbudzenia wyposażony w układ forsowania, który pozwala podczas zwarcia na utrzymanie określonej wartości reaktancji generatora.

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczone charakterystyki zmienności reaktancji zwarciowej w generatorze nowoczesnego zespołu prądowórczego oraz zmienności prądu zwarciowego na jego zaciskach. Parametry obwodu zwarciowego ulegają szybkiej zmianie, co powoduje trudności w uzyskaniu skutecznej ochrony przeciwporażeniowej w odległej instalacji odbiorczej realizowanej przez samoczynne wyłączenie.



Rys. 2. Unormowane charakterystyki.

a) zmienności reaktancji zwarciowej generatora

$$\frac{X_{k1G}}{X_{nG}} \cdot 100\% = f(T_k),$$

b) zmienności prądu zwarciowego generatora, przy zwarciu na jego zaciskach

$$\frac{I_{k1G}}{I_{nG}} \cdot 100\% = f(T_k).$$

gdzie:

X_{nG} - znamionowa reaktancja generatora (wartość w stanie statycznym) w $[\Omega]$,

X_{k1G} - reaktancja generatora dla zwarć jednofazowych w $[\Omega]$,

I_{nG} - prąd znamionowy generatora w $[A]$,

I_{k1G} - prąd zwarcia jednofazowego dla zwarć na zaciskach generatora w $[A]$,

T_k - czas trwania zwarcia w $[s]$.

W nowoczesnych zespołach prądowórczych, producent zapewnia (wskutek działania układów automatyki) utrzymanie prądu zwarciowego na zaciskach generatora o wartości $3 \cdot I_n$ przez 10 s (dłuższe utrzymywanie takiego stanu grozi zniszczeniem izolacji uzwojeń). Dzięki czemu do obliczeń skuteczności samoczynnego wyłączenia można przyjmować wartość reaktancji zwarciowej generatora X_{k1G} (na jego zaciskach) wyliczoną ze wzoru (1):

$$X_{k1G} = 0,33 \cdot X_{nG} = 0,33 \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \quad (1)$$

gdzie:

U_{nG} - napięcie znamionowe generatora zespołu prądowórczego w $[kV]$,

S_{nG} - moc znamionowa generatora zespołu prądowórczego w $[MVA]$,

X_{nG} - znamionowa wartość reaktancji generatora w $[\Omega]$.

W ogólnym przypadku, przy założeniu $I_k'' = n \cdot I_{nG}$ można zapisać wzór na reaktancję generatora dla zwarć jednofazowych jako: $X_{k1G} = \frac{U_{nG}^2}{n \cdot S_{nG}}$ (gdzie n – krotność prądu znamionowego utrzymywana podczas zwarć na zaciskach generatora, podawana przez producenta ZP w DTR).

Częstym błędem popełnianym przez mniej doświadczonych projektantów jest przyjmowanie impedancji zwarciowej generatora na podstawie impedancji transformatora o mocy równej mocy generatora zespołu prądowłórczego.

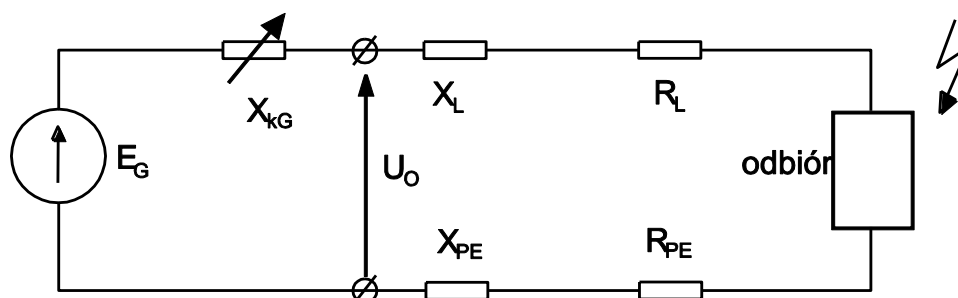
Dla porównania tych wartości w tabeli 1 zostały przedstawione impedancje wybranych transformatorów oraz generatorów. Przedstawiona w tabeli 1 reaktancja generatorów po 10 sekundach od chwili powstania zwarcia ulega znacznemu zwiększeniu (rysunek 2).

Tabela 1. Zestawienie impedancji transformatora i generatora o tej samej mocy.

Moc transformatora lub generatora Zespołu prądowłórczego, w [kVA]	Impedancja transformatora na jego zaciskach, w [Ω]	Reaktancja generatora na jego zaciskach przyjmowana dla obliczania skuteczności samoczynnego wyłączenia (rezystancja uzwojeń stanowi zaledwie $0,03 \cdot X_{nG}$ i może zostać pominięta w obliczeniach praktycznych), w [Ω]
100	0,072	0,528
160	0,045	0,330
250	0,028	0,211
400	0,018	0,132
500	0,014	0,106

Porównując dane przedstawione w tabeli 1 widać jak duże rozbieżności występują w wartościach impedancji zwarciowych obydwu źródeł ($\frac{Z_{k1G}}{Z_{kT}} \approx 7,33$).

Obwód zwarciowy dla potrzeb ochrony przeciwporażeniowej przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat jednofazowego obwodu zwarcia w instalacji zasilającej z zespołu prądowłórczego.

Odmienność warunków zasilania z zespołu prądowłórczego w odniesieniu do Systemu Elektroenergetycznego

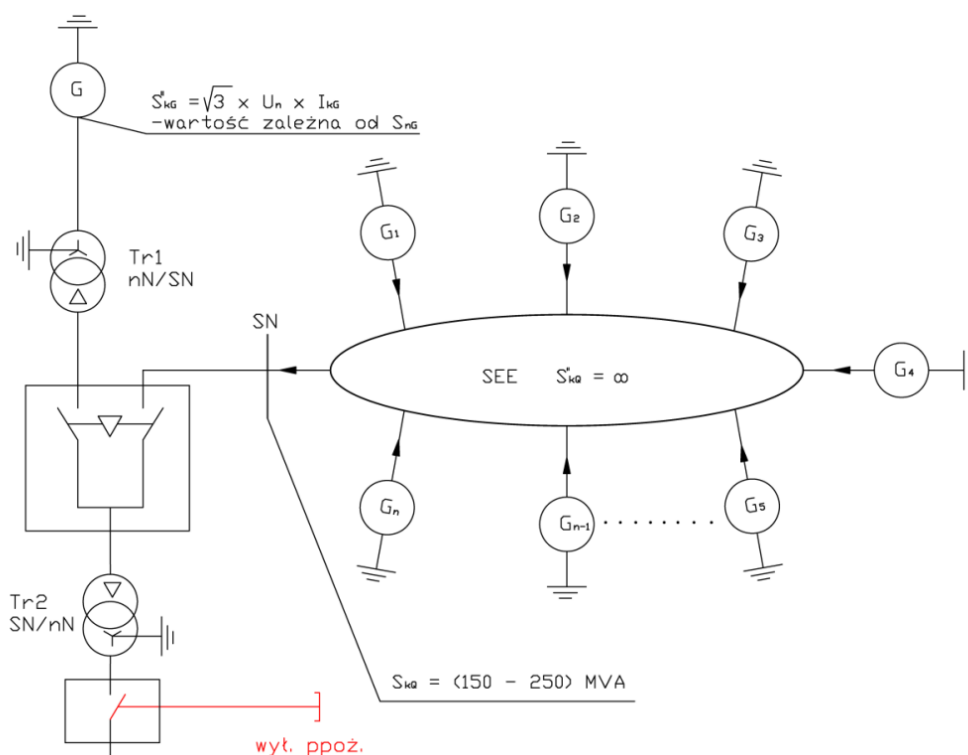
System Elektroenergetyczny (SEE) jest zasilany przez kilkadziesiąt generatorów przyłączonych za pośrednictwem transformatorów blokowych do sieci elektroenergetycznych WN pracujących w systemie zamkniętym.

Moc zwarciowa SEE w uproszczeniu jest określana jako nieskończona. Wartość mocy zwarciowej odniesiona do sieci SN kształtuje się na poziomie (150 –250) MVA.

Zespół prądowłórczy po przejściu zasilania stanowi jedyne źródło zasilania odbiorników objętych systemem zasilania awaryjnego i charakteryzuje się znacznie mniejszą mocą zwarciową, co wyjaśnia rysunek 4. W tabeli 2 zostały przedstawione wartości mocy zwarciowych wybranych zespołów prądowłórczych.

Tabela 2. Zestawienie mocy zwarciovych wybranych generatorów ZP.

Moc zespołu prądowórczego [kVA]	Moc zwarciova na zaciskach generatora [MVA]
100	1,0
200	2,0
500	5,0
1000	10,0
2000	20,0
6000	60,0



Rys. 4. Porównanie mocy zwarciovych SEE oraz generatora zespołu prądowórczego.

Zasady projektowania ochrony przeciwporażeniowej przy zasilaniu z generatora zespołu prądowórczego

Z pośród trzech układów sieci: TT, IT i TN (TN-C; TN-C-S i TN-S), przy zasilaniu obiektów budowlanych najbardziej nadaje się układ TN-S lub TN-C-S. Układ IT może być stosowany tylko w ograniczonym zakresie (np. blok operacyjny lub OIOM w szpitalu po spełnieniu określonych warunków).

Warunek samoczynnego wyłączenia w sieci TN, należy uznać za spełniony jeżeli:

$$I_{k1} = \frac{0,8 \cdot U_0}{Z_s} \geq I_a \quad (2)$$

$$Z_s = \sqrt{(X_{k1G} + X_L)^2 + (R_{kG} + R_L)^2} \quad (3)$$

gdzie:

Z_s - impedancja pętli zwarciovej obejmującej źródło zasilania, przewód roboczy, aż do punktu zwarcia i przewód ochronny między punktem zwarcia a źródłem w [Ω],

I_a - prąd powodujący samoczynne zadziałanie urządzenia wyłączającego, w czasie określonym przez normę PN-HD 60364-4-41:2009,

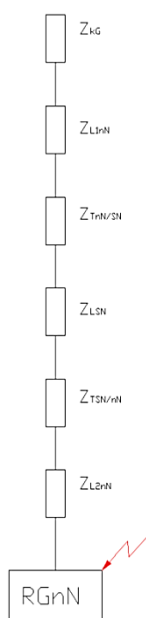
- U_0 - napięcie pomiędzy przewodem fazowym a uziemionym przewodem PEN lub PE, w [V],
- R_L - rezystancja przewodów stanowiących obwód pętli zwarcia w [Ω],
- X_L - reaktancja przewodów stanowiących obwód pętli zwarcia w [Ω],
- R_{kG} - rezystancja uzwojeń generatora ($R_{kG} = 0,03 \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}}$) w [Ω],
- X_{k1G} - reaktancja generatora dla zwarć jednofazowych (wg. wzoru 1) w [Ω].

Przy zasilaniu z zespołu prądowórczego uzyskanie skutecznej ochrony przeciwporażeniowej, przy zastosowaniu tylko urządzeń przetężeniowych może być nieskuteczne. Konieczne zatem wydaje się zastosowanie urządzeń różnicowoprądowych w instalacji odbiorczej. Do instalacji zasilającej gniazda przeznaczone do zasilania odbiorników ręcznych należy stosować wyłączniki różnicowoprądowe o znamionowym prądzie różnicowym nie większej od 30 mA.

Rezystancja uziemienia punktu neutralnego generatora zespołu prądowórczego nie może być wyższa niż 5 Ω . Wynika to bezpośrednio z normy N SEP-E 001.

W przypadku przyłączenia zespołu prądowórczego poprzez transformator nn/SN jak zostało przedstawione na rysunku 4, należy rozpatrywać obwód zwarcia od źródła, którym jest generator zespołu prądowórczego do chronionego odbiornika.

Jednokreskowy schemat obwodu zwarciego w takim przypadku przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Jednokreskowy schemat obwodu zwarciego dla układu zasilania awaryjnego z przyłączonym zespołem prądowórczym do linii SN.

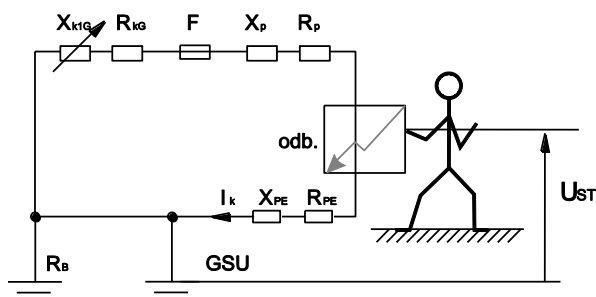
Impedancja obwodu zwarciego w takim przypadku zostanie wyrażona następującym wzorem:

$$Z = Z_{k1G} + 2 \cdot Z_{L1nN} + Z_{kTnN SN} + Z_{LSN} + Z_{kTSN SN} + 2 \cdot Z_{L2nN} \quad (4)$$

Dalsze obliczenia należy prowadzić zgodnie z wcześniej opisanymi zasadami, pamiętając przy tym że zmiany zachodzące w generatorze będą odzwierciedlane na zaciskach dolnego uzwojenia transformatora Tr2.

W przypadku gdy spełnienie warunku samoczynnego wyłączenia w instalacji zasilanej z zespołu prądowórczego jest niemożliwe, należy przeprowadzić ocenę skuteczności ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu (przed dotykem pośrednim) przez sprawdzenie, czy w czasie zwarcia doziemnego o prądzie zwarciovym równym I_a na częściach przewodzących dostępnych wystąpi napięcie dotykowe o wartości nie przekraczającej wartości napięcia dotykowego dopuszczalnego długotrwale w danych warunkach środowiskowych ($U_{ST} \leq U_L$).

Obwód zwarciový w takim przypadku przedstawia rysunek 6, na którym widoczny jest przewód ochronny PE łączący chronione urządzenie z GСУ budynku.



Rys. 6. Napięcie dotykowe na obudowie uszkodzonego odbiornika przy zwarciu jednofazowym z ziemią; I_k – prąd zwarciový; R_{kG} – rezystancja uzwojenia generatora; X_{k1G} – reaktancja generatora przyjmowana do obliczania zwarcí jednofazowych; R_p – rezystancja przewodów zasilających odbiornik; X_p – reaktancja przewodów zasilających odbiornik; R_{PE} – rezystancja przewodu ochronnego; X_{PE} – reaktancja przewodu ochronnego; F – zabezpieczenie; GСУ – główna szyna uziemiająca; R_B – rezystancja uziemienia generatora zespołu prądotwórczego.

W takim przypadku, zgodnie z wymaganiami określonymi w PN – HD 60364-4-41, uważa się że ochrona jest skuteczna, jeżeli spodziewane napięcie dotykowe U_{ST} jest mniejsze od napięcia U_L , dopuszczalnego długotrwale w danych warunkach środowiskowych, czyli:

$$U_{ST} = I_a \cdot Z_{PE} \leq U_L \quad (5)$$

gdzie:

I_a – prąd wyłączający urządzenia zabezpieczającego (w obwodzie zasilania zespołu prądotwórczego lub urządzenia odbiorczego) w czasie określonym przez normę PN-HD 60364-4-41:2009 w [A],

Z_{PE} – wartość impedancji przewodu połączenia wyrównawczego miejscowego PE pomiędzy chronionym urządzeniem a Główna Szyna Uziemiająca (GSU) w [Ω],

U_L – dopuszczalna długotrwale w danych warunkach środowiskowych wartość napięcia dotykowego w [V].

Przekształcenia wzoru (5), przy zastosowaniu uproszczenia: $Z_{PE} = R_{PE}$, pozwala na wyprowadzenie wzoru na wymagany przekrój przewodu ochronnego PE, łączącego chronione urządzenie z GСУ:

$$S \geq \frac{I_a \cdot l}{U_L \cdot \gamma} \quad (6)$$

gdzie:

l – długość przewodu ochronnego łączącego chronione urządzenie z GСУ w [m],

γ – konduktywność przewodu, w [(m/mm²· Ω)].

Przyjęcie przedstawionej koncepcji ochrony przeciwporażeniowej umożliwia, spełnienie wymagań normy PN-HD 60364-4-41:2009, w następujący sposób:

- przy $I_{k1} \geq I_a$, samoczynne wyłączenie zasilania chronionego odbiornika,
- przy $I_{k1} < I_a$, pojawienie się napięcia dotykowego spełniającego warunek: $U_{ST} \leq U_L$.

Zasady projektowania ochrony przeciwporażeniowej przy zasilaniu z UPS

W zasilaczu UPS przy zwarciu na jego wyjściu automatyka przekształtnika powoduje ograniczenie prądu znamionowego do wartości $2,5 I_n$. Ograniczenie prądu zwarciovego do takiej wartości jest podyktowane koniecznością ochrony elementów aktywnych przekształtnika. Może jednak to skutkować niemożliwością samoczynnego wyłączenia w czasie wymaganym przez normę PN-HD 60364-4-41:2009.

Należy jednak pamiętać, że w tym przypadku zwarcie jednofazowe jest cyklicznie zasilane przez wszystkie trzy fazy wskutek działania automatyki przekształtnika.

W takim przypadku zasadnym jest zabezpieczenie obwodów odbiorczych wyłącznikami różnicowoprądowymi o znamionowym prądzie różnicowym nie większym od 30 mA lub połączenie chronionego odbiornika z GSU budynku przewodem PE o przekroju dobranym zgodnie z wzorem (6).

Wnioski

Generator zespołu prądotwórczego jest źródłem miękkim, którego parametry ulegają zmianie wraz upływem czasu trwania zwarcia, w przeciwieństwie do transformatora w którym parametry zwarciove są praktycznie niezmiennie.

Zmienność impedancji zwarciovej generatora powoduje trudności w uzyskaniu ochrony przeciwporażeniowej przez samoczynne wyłączenie. Stosunek impedancji generatora w stanie przejściowym do impedancji transformatora o takiej samej mocy wynosi około 7,33. Stan ten jest utrzymywany sztucznie przez czas nie dłuższy niż 10 s. Po tym czasie impedancja generatora znacząco wzrasta i prądy zwarciove spadają poniżej wartości prądu znamionowego generatora. Pomimo to napięcie dotykowe o wartości większej od dopuszczalnej długotrwale nadal się utrzymuje i stwarza zagrożenia dla ludzi lub zwierząt.

W przypadku niemożliwości spełnienia ochrony przeciwporażeniowej realizowanej przez samoczynne wyłączenie zgodnie z wymaganiami normy PN-HD 60364-4-41:2009, należy zastosować wyłączniki różnicowoprądowe lub sterowanie wartością spodziewanego napięcia dotykowego w celu niedopuszczenia jego wartości ponad wartość dopuszczalną długotrwale.

Przy zasilaniu instalacji odbiorczej z odległego generatora zespołu prądotwórczego należy projektować układy przesyłowe z wykorzystaniem linii SN. W takim przypadku niedopuszczalnym jest ograniczenie obwodu zwarciowego do dolnych zacisków transformatora SN/nn. Należy pamiętać, że na zaciskach dolnych transformatora parametry zwarciove będą uzależnione od zmian impedancji generatora. Zmienność tych parametrów należy uwzględnić podczas obliczania prądów zwarciowych w instalacji, niezbędnych dla oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej realizowanej przez samoczynne wyłączenie.

Literatura

- [1] PN – ISO 8528-5 Zespoły prądotwórcze napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Zespoły prądotwórcze.
- [2] PN - HD 60364-4-41:2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
- [3] N SEP-E 001 Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przeciwporażeniowa
- [4] J. Wiatr; M. Orzechowski – Poradnik projektanta elektryka – DW Medium 2012 wydanie V
- [5] J. Wiatr – Zespoły prądotwórcze w układach zasilania awaryjnego – DW Medium 2008
- [6] P. Kacejko; J. Machowski – Zwarcia w systemach elektroenergetycznych – WNT 2001
- [7] praca zbiorowa pod redakcją J. Wiatr – Poradnik Projektanta systemów zasilania awaryjnego i gwarantowanego – EATON POWER QUALITY 2008
- [8] wieloarkuszowa norma PN-IEC 60364 – Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych
- [9] J. Wiatr; M. Miegoń – Zasilacze UPS i baterie akumulatorów w układach zasilania gwarantowanego – DW Medium 2008
- [10] L. Danielski; R. Zacirka – Badanie ochrony przeciwporażeniowej w obiektach z przemiennikami częstotliwości – elektro.info nr 12/2005