JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W MIKROSIECIACH NA WYBRANYM PRZYKŁADZIE TANDEMU ZESPÓŁ PRĄDOTWÓRCZY – BEZTRANSFORMATOROWY ZASILACZ UPS

W artykule przedstawiono analizę wpływu powiększonej impedancji przewodu neutralnego na zjawisko pojawiania się w przewodach roboczych składowej stałej prądu, generowanej przez beztransformatorowe zasilacze UPS. Wykazano, że wzrost impedancji przewodu neutralnego powoduje nasilanie się negatywnych zjawisk wnikania składowej stałej prądu do instalacji odbiorczej obiektu, zasilanej z zespolów prądotwórczych. Przedstawiono skutki tych zjawisk i wykazano błędy projektowe i montażowe.

WSTĘP

Stosowanie zespołów prądotwórczych jako rezerwowego źródła zasilania oraz współpracujących z nimi zasilaczy UPS stało się zjawiskiem powszechnym i dotyczy coraz większej liczby obiektów, w których ciągłość zasilania jest priorytetem. Zespół prądotwórczy jako obiekt o ograniczonej mocy (w stosunku do sieci sztywnej) podlega zjawiskom silnego oddziaływania odbiorników, szczególnie tych, które odkształcają prąd pobierany z generatora. W konsekwencji obniża się jakość energii elektrycznej w tego rodzaju mikrosieciach, co ma bezpośredni wpływ na jakość pracy zasilanych odbiorników.

W artykule omówiono problem oddziaływania zespołów prądotwórczych na zasilacze UPS w szczególnym przypadku, jakim jest szeregowe włączanie dodatkowej rezystancji w przewodzie neutralnym, pochodzącej od dodatkowego stycznika załączanego dla stanu "praca wyspowa" zespołu prądotwórczego. Przedstawiono wyniki pomiarów eksperymentalnych, wykonanych w różnych punktach obiektu i w różnych stanach jego pracy oraz wyjaśniono przyczyny awarii, do której doszło na skutek błędów projektowych i montażowych.

1. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W ŚWIETLE DOKUMENTÓW NORMALIZACYJNYCH

Jakość energii elektrycznej w systemach zasilania gwarantowanego zależy od wielu czynników i jest kluczowa dla poprawnej pracy obiektu, w którym występują zasilacze UPS i zespoły prądotwórcze. Parametry jakości energii elektrycznej ujęte są w obecnie obowiązującej normie PN-EN 50160:2010E – Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych [3], natomiast metody pomiaru tych parametrów określone są w normie PN-EN 61000-4-30:2008 – Testing and measurement techniques – power quality measurement methods [4]. Parametry określone w normie [3] dotyczą wymagań, jakie powinno spełniać zasilanie w publicznych sieciach energetycznych oraz w obiektach zasilanych ze źródeł awaryjnych w układzie wyspowym. Poniżej wyszczególniono kilka parametrów, które są najistotniejsze z punktu widzenia jakości energii elektrycznej dla obiektu o wysokich wymaganiach co do ciągłości i jakości zasilania.

1.1. Punkt 4.2.1 normy PN-EN 50160:2010E

Punkt ten określa dopuszczalne odchylenie częstotliwości dla systemów zasilanych z sieci energetycznej oraz w układzie zasilania wyspowego (np. z zespołu prądotwórczego niezsynchronizowanego z siecią) przy założeniu, że wartość znamionowa częstotliwości wynosi 50 Hz. Wartość średnia częstotliwości mierzonej przez 10 s dla obiektów zasilanych z sieci energetycznej powinna być zawarta w przedziale:

- 50 Hz ±1% (tzn. od 49,5 Hz do 50,5 Hz) przez 99,5% roku;
- 50 Hz +4%/-6% (tzn. od 47 Hz do 52 Hz) przez 100% roku.

Wartość średnia częstotliwości mierzonej przez 10 s dla obiektów w układzie zasilania wyspowego powinna być zawarta w przedziale:

- 50 Hz ±2% (tzn. od 49 Hz do 51 Hz) przez 99,5% tygodnia;
- 50 Hz ±15% (tzn. od 42,5 Hz do 47,5 Hz) przez 100% tygodnia [3].

1.2. Punkt 4.2 normy PN-EN 50160:2010E

W punkcie tym określono zmiany napięcia zasilającego z podziałem na dopuszczalne zmiany napięcia i metody sprawdzania jego odchyleń (p. 4.2.2) oraz nagłe zmiany napięcia i jego odchylenia (p. 4.2.3).

W p. 4.2.2.1 określone są wymagania dla napięcia zasilającego, którego zmiany w normalnych warunkach zasilania nie powinny przekraczać $U_n \pm 10\%$ (dla obiektów odległych lub niepołączonych z systemem energetycznym dopuszcza się zmiany napięcia +10% i -15% od wartości znamionowej U_n , o czym dany użytkownik powinien być poinformowany). W p. 4.2.2.2 określono metodę sprawdzania odchyleń wartości napięcia zasilającego. W każdym tygodniu 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego powinno mieścić się w przedziale odchyleń $U_n \pm 10\%$, ale we wszystkich okresach pomiarowych odchylenia napięcia powinny mieścić się w granicach +10% i -15% U_n [3].

1.3. Punkt 4.2.3 normy PN-EN 50160:2010E

W p. 4.2.3 określono nagłe zmiany napięcia, scharakteryzowane:

- wskaźnikiem migotania światła (p. 4.2.3.2) przez 95% czasu każdego tygodnia, wskaźnik długookresowego migotania światła *Plt* spowodowanego wahaniami napięcia zasilającego nie powinien być większy od 0,8;
- asymetrią napięcia (p. 4.2.4) w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych wartości składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego powinny mieścić się w przedziale od 0 do 2% wartości składowej kolejności zgodnej;
- zawartością wyższych harmonicznych napięcia dopuszczalne wartości poszczególnych harmonicznych określa tabela 1 w p. 4.2.5. Ponadto występuje zapis, określający dopuszczalną sumaryczną zawartość harmonicznych THDu, do 40. włącznie, w napięciu zasilającym nieprzekraczającą wartości 8% [3].

Tabela 1. Dopuszczalna zawartość poszczególnych harmonicznych napięcia zasilającegowg normy PN-EN 50160:2010E [3]

Harmoniczne nieparzyste				Harmoniczne parzyste	
niebędące wielokrotnością 3		będące wielokrotnością 3			wartość
rząd harmonicznej (<i>h</i>)	wartość względna napięcia w procentach składowej podstawowej (u _h) [%]	rząd harmonicznej (<i>h</i>)	wartość względna napięcia w procentach składowej podstawowej (<i>u_h</i>) [%]	rząd harmonicznej (<i>h</i>)	względna napięcia w procentach składowej podstawowej (u _h) [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	> 4	0,5
13	3	> 15	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

 Table 1. Admissible content of particular harmonics according to standard PN-EN 50160:2010E [3]
 Przedstawione powyżej fragmenty normy PN-EN 50160:2010E mają służyć porównaniu wyników pomiarów do określonych tą normą parametrów jakości energii elektrycznej w celu ustalenia, czy pomierzone wartości napięcia i częstotliwości spełniają wymagania tej normy.

2. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO OBIEKTU

System zasilania gwarantowanego badanego obiektu oparty jest na dwóch zasilaczach UPS o mocy 200 kVA o konstrukcji modułowej oraz systemie pracy równoległej dwóch zespołów pradotwórczych o mocy 500 kVA każdy, pracujących na sumowanie mocy w układzie 2+0 (bez redundancji). Schemat strukturalny zasilania gwarantowanego obiektu przedstawia rysunek 1. Zasilacze UPS pracujące równolegle zasilaja systemy komputerowe, których pobór mocy w normalnym stanie pracy obiektu kształtował się na poziomie od 100 do 160 kW. Czas podtrzymania zasilaczy UPS wynosił około 10 min i był wystarczający na uruchomienie zespołów pradotwórczych w przypadku zaniku napięcia sieci. Oba zespoły startowały jednocześnie i po synchronizacji były przyłączane przez wyłączniki Q7 i Q8 na szyny główne rozdzielni. Obciążenie całego obiektu dochodziło w szczycie do 500 kW (w szczególnych przypadkach do 700 kW). Zespoły prądotwórcze posiadały funkcję pracy synchronicznej z siecią, dzięki czemu użytkownik, w przypadku wysokiego poboru energii elektrycznej, miał możliwość załączania generatorów do pracy synchronicznej z siecią sztywna i "zdejmowania" części obciążenia z transformatora ze względu na podpisaną z zakładem energetycznym umową na dostawę energii.

Na obiekcie pojawiały się problemy z zasilaniem w stanach zaniku napięcia sieci i pracy wyspowej zespołów prądotwórczych. Występował efekt migotania światła, uszkadzały się niektóre odbiorniki, zasilacze itp. Badany obiekt był wielokrotnie sprawdzany przez różne firmy i mimo pozytywnych wyników testów sprawnościowych dotyczących zarówno zespołów prądotwórczych, jak i zasilaczy UPS doszło w końcu do awarii typu katastroficznego, której skutkiem był zanik napięcia w newralgicznym systemie komputerowym oraz uszkodzenie wszystkich zasilaczy UPS 3 × 160 kVA (pierwotnie zainstalowanych). Przypadek ten jest szczególnie interesujący, ponieważ standardowe pomiary nie wskazywały na dysfunkcję któregokolwiek z urządzeń zasilających. Ze względu na ograniczoną możliwość testowania obiektu w czasie przeprowadzonych prób eksperymentalnych zredukowano pobór mocy systemu komputerowego do 60 kW, co stanowiło około 40% normalnego obciążenia systemu UPS w czasie normalnej pracy obiektu.



Rys. 1. Schemat strukturalny zasilania gwarantowanego obiektu z uwidocznieniem przewodu neutralnego [2]
 Fig. 1. Structural diagram of building uninterruptable power supply system

with neutral visualization [2]

3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

3.1. Odchylenia napięcia i częstotliwości

Napięcie pomierzone w rozdzielni ma różne wartości odchyleń dla stanu zasilania obiektu z transformatorów oraz dla stanu zasilania obiektu z zespołów prądotwórczych.

Występuje też trzeci stan pracy, jakim jest praca synchroniczna zespołów prądotwórczych z siecią. Zmiany wartości skutecznej napięcia w fazie L1 w czasie testowania obiektu dla różnych stanów pracy przedstawiono na rysunku 2. Wyniki dla faz L2 i L3 są zbliżone.

Zarówno dla stanu zasilania obiektu z sieci, jak i z generatorów pracujących "na wyspę" parametry napięcia i częstotliwości mieszczą się w zakresie tolerancji określonej normą [3]. Nawet zmiana wartości napięcia widoczna na rysunku 2 w powiększeniu (punkt "a"), ilustrująca moment skokowego obciążenia zespołów prądotwórczych, mieści się w granicach tolerancji określonych w p. 4.2.2.1, w którym norma przewiduje zmianę wartości napięcia nawet do -15% w przypadku systemów zasilania niepołączonych z systemem energetycznym, a takim jest praca wyspowa zespołów prądotwórczych.



Rys. 2. Zmiany wartości skutecznej napięcia w fazie L1 w czasie testowania obiektu dla różnych stanów pracy. Okresy pomiarowe 1, 3, 5 – praca wyspowa zespołów prądotwórczych, 2, 4 – stan pracy obiektu zasilanego z transformatorów, 6 – praca synchroniczna zespołów prądotwórczych z siecią [4]

Fig. 2. L1 RMS voltage changes during the system testing for different operating states. Measurement periods 1, 3, 5 – genset island mode, 2, 4 – transformers are supplying the system, 6 – genset in parallel with mains mode [4]

Zmiana wartości napięcia do 203 V w stosunku do wartości znamionowej napięcia 230 V stanowi ok. 12% U_n . Jest to jednak trend wynikający z pomiaru uśrednionego za 10 okresów. W tym czasie najmniejsza pomierzona wartość napięcia za 1/2 okresu $U_{rms(1/2)} = 193,6$ V [4], co stanowi zmianę 15,8%, a więc minimalnie przekracza dopuszczalne odchylenie napięcia wg normy [3], p. 4.2.2.1. Częstotliwość ze względów oczywistych jest stabilna dla stanu zasilania obiektu z sieci. Pomiary częstotliwości w trakcie zasilania obiektu przez sieć sztywną wykazały minimalne odchylenia i zostały uznane za zmiany marginalne. Natomiast znaczące zmiany częstotliwości zaobserwowano w czasie pracy wyspowej zespołów prądotwórczych, co przedstawia rysunek 3.

Największe zmiany częstotliwości zarejestrowano w czasie załączania odbiorów większej mocy (agregat chłodniczy), co widoczne jest na rysunku 3 w punkcie "a". Zmiany te odpowiadają zmianom napięcia w punkcie "a" na rysunku 2. Wartość zmian częstotliwości nie przekracza dopuszczalnego przedziału 49–51 Hz, określonego w punkcie 4.2.1 normy [3], a zmiany w zakresie od 47,5 do 52,5 Hz nie przekraczają dozwolonego czasu 0,5%.



Rys. 3. Zmiany częstotliwości w czasie zasilania obiektu z zespołów prądotwórczych [6]*Fig. 3. Frequency changes when the system is supplied by genset [6]*

3.2. Odkształcenia krzywych przebiegu napięcia

Harmoniczne napięcia w czasie trwania próby pomierzono na szynach rozdzielni RGnn, a przebiegi zaprezentowano na rysunku 4. Do oceny poziomu odkształceń napięcia przyjęto współczynniki THDS, TIHDS, TWD, gdzie: THDS – współczynnik odkształcenia harmonicznymi obliczany na podstawie podgrup harmonicznych do 50. rzędu włącznie, TIHDS – współczynnik odkształcenia interharmonicznymi obliczany na podstawie podgrup interharmonicznych do 49. rzędu włącznie, TWD – współczynnik całkowitego odkształcenia obliczany w paśmie do 10 kHz (stosunek wartości skutecznej pozostałości, po wyeliminowaniu składowej podstawowej, do wartości skutecznej składowej podstawowej wyrażony w procentach) [6].



Rys. 4. Przebieg THDS, TIHDS, TWD w mierzonym napięciu zasilania w RGnn w czasie trwania próby [6]

Fig. 4. THDS, TIHDS, TWD waveform present in measured voltage in main switchboard during the system testing [6]



Na rysunku 5 przedstawiono przebieg zmian współczynnika THD prądu w fazie L1, L2 i L3.

Rys. 5. Zmiana współczynnika THD prądów w fazach: L1 (czerwony), L2 (zielony), L3 (niebieski) mierzonych na wyjściu UPS [3]

Fig. 5. THD change of currents: L1 (red), L2 (green), L3 (blue) measured in UPS output [3]

Zmniejszenie współczynnika THD prądów po godz. 21.45 było związane z przywróceniem normalnego stanu obciążenia systemu UPS, tj. ok. 160 kW. Wśród harmonicznych nieparzystych główną składową stanowiła 3. harmoniczna, której procentowy udział kształtował się na poziomie 30% – świadczy to o występowaniu dużej liczby nieliniowych odbiorników jednofazowych. W tym czasie napięcie na wyjściu UPS mimo dużego odkształcenia prądu jest stabilne, co przedstawia rysunek 6.

Współczynnik odkształcenia napięcia THD na wyjściu UPS na skutek odkształconego prądu mieścił się w zakresie nieprzekraczającym wartości określonych w punkcie 4.2.3 normy [3] i wynosił < 1,3%.



Rys. 6. Zmiana współczynnika THD dla napięć na wyjściu UPS w trzech fazach: L1 (czerwony), L2 (zielony), L3 (niebieski) [3]

Fig. 6. THD change of voltages: L1 (red), L2 (green), L3 (blue) measured in UPS output [3]

Z zaprezentowanych powyżej przebiegów i wyników wykonanych pomiarów nie wynika, że parametry jakości energii elektrycznej przekraczają dopuszczalne przedziały określone normą [3]. Można sformułować wniosek, że parametry jakości energii elektrycznej są dobre, tzn. w granicach tolerancji, a stan pewności zasilania obiektu można określić na bardzo wysoki. Wszystkie urządzenia pracowały właściwie, a symulowane zaniki napięcia w obiekcie kończyły się podtrzymaniem zasilania przez zasilacze UPS i zadziałaniem automatyki zespołów prądotwórczych. Niestety w omawianym obiekcie dochodziło do stanów, w których występowały zaniki napięcia i awarie wynikające z oddziaływania zespołów prądotwórczych na zasilacze UPS.

3.3. Analiza napięć i prądów na wyjściu systemu dwóch UPS w pracy równoległej

Pomiary wykonane w dniu testowania obiektu po dogłębnej analizie wykazały niepokojące zjawiska, które były przyczyną uszkodzenia poprzednio pracujących zasilaczy UPS 3×160 kVA. Dopiero rejestracja przebiegów napięcia i prądu w czasie rzeczywistym wykazała występowanie zjawiska niebezpiecznego dla obiektu. Na rysunku 7 przedstawiono oscylogramy zsynchronizowane w czasie dla napięcia i prądu na wyjściu UPS.



Rys. 7. a) zmiany wartości skutecznej napięć fazowych na wyjściu UPS: L1 (czerwony), L2 (zielony), L3 (niebieski); b) zmiany wartości chwilowych napięcia w wybranej fazie L1 na wyjściu UPS; c) zmiany wartości chwilowych prądu w przewodzie neutralnym na wyjściu UPS; d) zmiany wartości chwilowych prądów w trzech fazach na wyjściu UPS: L1 (czerwony), L2 (zielony), L3 (niebieski) [3]

Fig. 7. a) RMS phase voltage change in the UPS output: L1 (red), L2 (green), L3 (blue);
b) the instantaneous values of voltage change in L1 phase in the UPS output;
c) the instantaneous values of current in UPS output neutral line; d) the instantaneous values of current in 3 phases of UPS output: L1 (red), L2 (green), L3 (blue) [3]

W przewodzie neutralnym występuje prąd o wartości skutecznej około 75 A niezmienny w czasie wykonywania prób. Jednak w przebiegach chwilowych pojawia się wielokrotnie składowa stała zazwyczaj o biegunowości ujemnej zanikająca w ok. 2 s. Powoduje to pojawienie się wartości chwilowych prądu do 300 A.

Dodatkowo prąd w przewodzie zerowym ma częstotliwość 3f w związku z sumowaniem algebraicznym głównie 3. harmonicznej i jej wielokrotności. W prądach fazowych od L1 do L3 na wyjściu UPS również pojawia się składowa stała w tym samym czasie co w przewodzie neutralnym.

Stała czasowa zanikania składowej stałej w przewodach fazowych jest znacznie krótsza niż w przewodzie neutralnym i wynosi ok. 0,5 s. Przedstawiony na rysunku 7 charakterystyczny przypadek występowania składowej stałej w przewodzie neutralnym został zarejestrowany wielokrotnie w czasie trwania prób i był związany ze zmianą obciążenia w badanym obiekcie dla warunku zasilania obiektu przez zespoły prądotwórcze (praca wyspowa). Występowanie składowej stałej prądu w przewodzie neutralnym oraz w napięciu zasilającym na wyjściu UPS w okresie pomiarowym przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przebieg składowej stałej DC prądu w przewodzie neutralnym oraz w napięciu zasilającym z UPS za badany okres pomiarowy. Na przebiegu zaznaczono moment, który został przedstawiony na rysunku 7 w powiększeniu [3]



W trakcie oględzin instalacji elektrycznej stwierdzono obecność styczników w przewodzie neutralnym generatorów, które załączały się podczas zasilania obiektu przez zespoły prądotwórcze w trybie pracy wyspowej, po zaniku napięcia sieci. Na rysunku nr 1 zaznaczono je jako aparaty K1 i K2. Ideą zastosowania styczników w miejscu wskazanym na rysunku 1, równolegle z wyłącznikami 3-polowymi zespołów prądotwórczych, było ograniczenie wpływu składowej stałej oraz prądów wyrównawczych na pracę synchroniczną zespołów z siecią. Niestety prąd znamionowy zastosowanego stycznika miał wartość 160 A w stosunku do 721 A prądu znamionowego generatora. Stycznik został podłączony 3 przewodami o przekroju 50 mm² (podczas gdy przewód neutralny z generatora został wyprowadzony przekrojem 2 × 240 mm²), co powodowało dodatkowe spadki napięć i oznaczało *de facto* włączenie w szereg dodatkowej rezystancji przewodu neutralnego w obwodzie zasilania obiektu w trybie zasilania z zespołów prądotwórczych. Na rysunku 9 przedstawiono zarejestrowany spadek napięcia na styczniku i przewodach doprowadzających 3 × 50 mm² należących do zespołu nr 2, w stosunku do przewodu PE. Bardzo zbliżony przebieg i wartości spadków napięcia uzyskano dla zespołu prądotwórczego nr 1.



Rys. 9. Rejestracja spadku napięcia na styczniku w przewodzie N dla zespołu prądotwórczego nr 2 w stosunku do przewodu PE w czasie próby pracy wyspowej zespołów prądotwórczych [3]

Fig. 9. Voltage drop in contactor in neutral according to PE line recorded in genset nr 2 during islande mode testing

W ciągu 10 min spadek napięcia, mierzony na styczniku wraz z przewodami o zmniejszonym przekroju, zwiększył się z 2,82 do 3,04 V przy ustalonej wartości prądu w przewodzie neutralnym. Tendencja wzrostowa była związana z nagrzewaniem się styków stycznika, mimo iż warunki chłodzenia w czasie prób były bardzo dobre, ponieważ pokrywy rozdzielnicy zespołów, w której znajdowały się styczniki obu zespołów, były odsłonięte, podczas gdy w normalnym stanie pracy są zasłonięte. Prądy w przewodzie neutralnym w czasie prób (na poziomie 60 A) były stosunkowo niewielkie, ale i tak zaobserwowano spadki napięcia w stanach nieustalonych o wartości skutecznej około 10 V, co widoczne jest w postaci dwóch pików na rysunku 9. Każda zmiana obciążenia powodowała stany nieustalone, podczas których pojawia się składowa stała prądu zarówno w przewodzie neutralnym, jak i w przewodach fazowych. Na skutek zmiany potencjału przewodu neutralnego w miejscu podłączenia zasilaczy UPS względem potencjału PE pojawia się składowa stała prądu w przewodzie neutralnym i w przewodach fazowych. Prąd stały w przewodzie neutralnym obiektu pochodzi z baterii UPS, której środek połączony jest z przewodem neutralnym obiektu, co widoczne jest na schemacie strukturalnym (rys. 1). Baterię stanowią bezobsługowe akumulatory AGM o pojemności 65 Ah połączone w dwóch łańcuchach (po 32 sztuki w każdym) z wyprowadzonym środkiem podłączonym do przewodu neutralnego obiektu.

W efekcie opisanych zjawisk doszło do uszkodzenia 3 zasilaczy UPS, o mocy 160 kVA każdy. Zasilacze UPS pracowały wtedy równolegle i były zasilane przez zespoły prądotwórcze, pracujące na wyspę. W trakcie analizy zdarzeń i w wyniku przeprowadzonych pomiarów okazało się, że istotnym elementem powodującym nasilanie się zjawiska wnikania składowej stałej prądu do przewodu neutralnego była różnica w sumarycznej rezystancji wewnętrznej baterii akumulatorów gałęzi dodatniej względem ujemnej. Jeżeli na skutek wahań napięcia w sieci zasilanej z zespołów prądotwórczych zasilacz przełączy się w tryb pracy bateryjnej, to płynący prąd w obwodzie baterii wywoła różny spadek napięcia na sumarycznej rezystancji wewnętrznej baterii, do którego podłączony jest przewód neutralny.

Na rysunku 10 przedstawiono schemat zastępczy baterii akumulatorów w obwodzie zasilania falownika UPS. W jednej gałęzi znajdują się 32 akumulatory o napięciu 12 V. Rezystancja wewnętrzna dla pojemności 65 Ah wynosi ok. 4 m Ω . Jeżeli zdarzy się kilka uszkodzonych baterii o rezystancji kilkukrotnie większej, to może zdarzyć się sytuacja, że:

• rezystancja zastępcza sekcji 1: $R_{w2} = 32 \times 0,004 = 0,128 \Omega$,

• rezystancja zastępcza sekcji 1: $R_{w1} = 32 \times 0,008 = 0,256 \Omega.$

Dla prądu rozładowania baterii $I_0 = 100$ A napięcia U_1 i U_2 wyniosą odpowiednio: $U_1 = E - I_0 \times R_{w1} = 383$ V - 25,6 V = 357,4 V,

 $U_2 = E - I_0 \times R_{w2} = 383 \text{ V} - 12,8 = 370,2 \text{ V}.$



The middle point of the battery is connected to the neutral line of the building power supply system [1]



Reasumując, można stwierdzić, że w omawianej sytuacji punkt gwiazdowy generatora nie jest uziemiony bezpośrednio przy generatorze, a ok. 100 m dalej w RGnn. Niestety między punkt gwiazdowy generatora a punkt PEN w RGnn włączona jest szeregowo impedancja obwodu stycznika i krótkich przewodów o przekroju znacząco mniejszym od przekroju przewodu roboczego (zamiast $2 \times 240 \text{ mm}^2$ stycznik podłączony jest przewodami $3 \times 50 \text{ mm}^2$). W stanach nieustalonych podczas załączenia różnej mocy odbiorów w systemie obiektu zasilanego z zespołów prądotwórczych dochodzi do zmiany potencjału przewodu neutralnego względem PE, co skutkuje pojawianiem się składowej stałej w przewodzie neutralnym oraz w przewodach fazowych. To z kolei powoduje zmianę wartości skutecznych napięć fazowych falownika UPS względem przewodu neutralnego, czego skutkiem była awaria zasilaczy UPS $3 \times 160 \text{ kVA}$, a konkretnie uszkodzenie tranzystorów IGBT falownika UPS, jak również części odbiorów pracujących w systemie zasilania obiektu [2].

PODSUMOWANIE

- Zastosowanie styczników w przewodzie neutralnym jako niezależnego aparatu łączeniowego niesie ze sobą duże zagrożenie dla bezpiecznej pracy obiektu, wynikające z możliwości nierównoczesnego załączenia stycznika oraz wyłącznika generatora. Zgodnie z normą PN-HD 60364-4 p. 4.3.1.3. *Rozłączanie i powtórne łączenie przewodu neutralnego w układach wielofazowych* [5] stwierdza się, że: "Jeżeli rozłączenie przewodu neutralnego jest wymagane, to rozłączenie to i ponowne połączenie powinno być takie, aby przewód neutralny nie był rozłączony przed przewodami liniowymi i aby był połączony w tym samym czasie lub wcześniej niż przewody liniowe". Stosowanie dwóch niezależnych aparatów do łączenia przewodów fazowych oraz przewodu neutralnego niesie ryzyko łączenia przewodu neutralnego w czasie rzeczywistym innym niż styki główne wyłącznika 3 polowego, co kłóci się z zapisem przytoczonej normy. Co więcej awaria stycznika lub układu sterującego pracą stycznika spowoduje zmianę układu zasilania z TNS na IT – zmienia to w sposób oczywisty bezpieczeństwo zasilania obiektu, projektowanego jako TNS.
- 2. Dobór stycznika o prądzie znamionowym mniejszym niż prąd znamionowy zespołu prądotwórczego, jak również zastosowanie do podłączenia stycznika przewodów, których przekrój jest znacząco mniejszy od przewodów roboczych, powoduje dodatkowe spadki napięć w przewodzie neutralnym mających szczególne znaczenie w zmiennych warunkach obciążenia obiektu. Jest to ewidentny błąd projektowy.
- 3. Podczas badań stwierdzono pojawianie się niekorzystnych zjawisk związanych ze składową stałą prądu w przewodzie neutralnym dla warunku zasilania obiektu z zespołów prądotwórczych. Zjawisko występowania składowej stałej o wartości ponad 100 A z czasem zanikania od kilku do kilkunastu sekund

zagraża bezpieczeństwu obiektu od strony ciągłości zasilania i pojawianiu się chwilowych wartości napięć, mogących zakłócać pracę odbiorów. "Wnikanie" składowej stałej do obwodów przemienno-prądowych stwarza duże zagrożenie dla poprawnej pracy odbiorów, może być powodem chwilowych zmian wartości napięcia zasilającego, a w konsekwencji przyczyną uszkodzeń odbiorów i zasilaczy UPS, co miało miejsce w analizowanym obiekcie.

4. Beztransformatorowa technologia UPS wymaga ciągłości przewodu neutralnego w każdym stanie pracy. Producenci beztransformatorowych zasilaczy UPS warunkują prawidłowe działanie UPS koniecznością ciągłości przewodu neutralnego w każdym stanie pracy UPS. Wybór beztransformatorowych zasilaczy UPS do zasilania serwerowni w przypadku możliwości pojawienia się dodatkowej znaczącej impedancji w przewodzie neutralnym lub jego przerwanie zagraża bezpiecznej pracy serwerowni. Konieczne jest zapewnienie ciągłości przewodu neutralnego o impedancji identycznej jak dla przewodów fazowych [2].

LITERATURA

- 1. Olesz M., Katarzyński J., Audyt pewności zasilania serwerowi i systemów informatycznych budynku Asseco biuro Gdynia, 2014.
- 2. Olesz M., Katarzyński J., Ekspertyza parametrów jakości energii elektrycznej w obiekcie Asseco Gdynia, 2014.
- 3. PN-EN 50160:2010E Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- 4. PN-EN 61000-4-30:2008 Testing and measurement techniques power quality measurement methods.
- 5. PN-HD 60364-4 Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa, ochrona przed prądem przetężeniowym.
- 6. Raport z pomiarów jakości napięcia zasilającego wykonanych w dniu 3.01.2014 r. w obiekcie Asseco Gdynia na szynach rozdzielnicy RGnn, Tarasiuk T., Piłat A.

MICROGRID POWER QUALITY IN PARTICULAR EXAMPLE OF GENERATING SETS AND TRANSFORMELESS UPS IMPACT. CASE STUDY

Summary

Analysis of neutral line increased impedance impact on phenomenon of transformerless UPS DC current leakage into AC installation is presented. It has been pointed out that the bigger is the value of installation neutral impedance the stronger is negative phenomenon of UPS DC current leakage into AC installation, supplied from generating sets. The effects of the impact has been presented. Design and installation mistakes have been pointed out.