



ZAPADY NAPIĘCIA I KRÓTKIE PRZERWY W ZASILANIU

dr hab. inż. Zbigniew HANZELKA

W artykule zaprezentowano dwa rodzaje zaburzeń elektromagnetycznych: zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu. Przedstawiono ich źródła, skutki, możliwe sposoby eliminacji oraz metody pomiaru w stopniu niezbędnym dla formułowania postanowień kontraktowych. Opierając się na istniejących normach i przepisach, wyróżniono te zagadnienia, które powinny być uwzględnione przy zawieraniu umowy pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii elektrycznej.

1. DEFINICJE

Zapad napięcia

Nagle zmniejszenie się napięcia w sieci elektrycznej poniżej zadanej wartości progowej, w czasie nie krótszym niż 10 ms, zakończone powrotem napięcia do wartości równej lub bliskiej wartości początkowej.

UWAGA 1: Zapad napięcia najczęściej charakteryzowany jest poprzez czas trwania i napięcie resztkowe (także amplitudę zapadu – rys. 1).

UWAGA 2: Wartość progowa jest wartością skuteczną napięcia określoną w celu wyznaczenia początku i końca zapadu. Może być wyrażona w woltach lub w jednostkach względnych (procentach) napięcia referencyjnego.

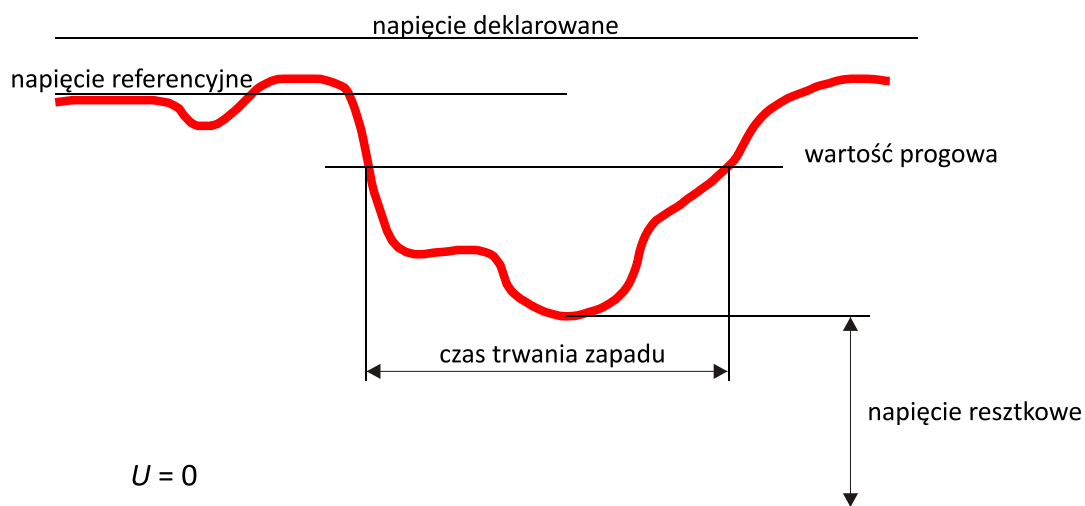
Krótką przerwa w zasilaniu

Nagle zmniejszenie się napięcia we wszystkich fazach sieci elektrycznej poniżej wartości progowej, zakończone powrotem napięcia do wartości równej lub bliskiej wartości początkowej.

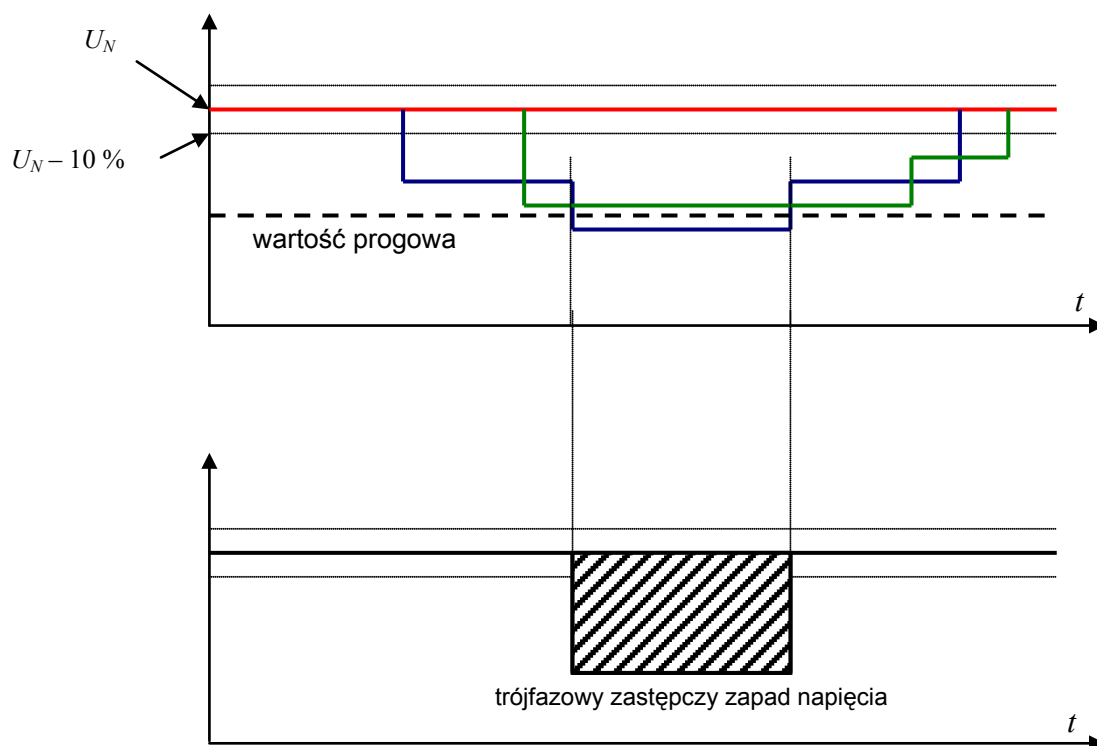
Napięcie referencyjne (zapadu)

Wartość odniesienia, w stosunku do której podawane są w jednostkach względnych (procentach) amplitudy, progi i inne wielkości charakteryzujące zaburzenie (rys.1).

UWAGA: Często jako napięcie referencyjne przyjmuje się znamionowe lub deklarowane napięcie systemu zasilającego. Może być ono także wyznaczane w przesuwym oknie czasowych bezpośrednio przed wystąpieniem zapadu.



Rys. 1. Amplituda i napięcie resztkowe zapadu napięcia. Jako wartość progową przyjęto przykładowo $0,9U$.



Rys. 2. Wpływ przyjętej wartości progowej na czas trwania zapadu (porównaj z rys. 2)

Czas trwania zapadu

Czas pomiędzy chwilą, w której napięcie w rozważanym punkcie systemu zasilającego zmaleje poniżej wartości progowej początku zapadu, i chwilą, w której przekroczy ono wartość progową końca zapadu.

UWAGA 1: W systemach wielofazowych różnie definiuje się początek i koniec zapadu. Dla potrzeb tego rozdziału przyjęto, że trójfazowy zapad zaczyna się w chwili, gdy wartość napięcia pierwszej zakłóconej fazy zmniejszy się poniżej wartości progowej początku zapadu, i kończy się, gdy napięcia we wszystkich fazach będą równe lub większe od wartości progowej końca zapadu.

UWAGA 2: Czas trwania trójfazowego zapadu napięcia zależy od przyjętej wartości progowej (rys. 2).

2. OPIS ZABURZENIA

Źródła zapadów napięcia

Główną przyczyną zapadów napięcia są zwarcia występujące w systemie elektroenergetycznym. Wywołują przepływ bardzo dużych prądów i w następstwie duże spadki napięć na impedancjach sieci zasilającej. Są nieuniknionymi stanami pracy systemu.

Typowa sieć elektroenergetyczna, wraz z generatorami, odbiornikami i impedancjami sprzęgającymi, stanowi zintegrowany systemem dynamiczny – każda zmiana napięcia, prądu, impedancji itd. w dowolnym jego punkcie wywołuje bezzwłocznie zmiany stanu w pozostałych punktach systemu. W miejscu zwarcia napięcie maleje do zera. Równocześnie w niemal wszystkich innych punktach systemu ulega zmianie w stopniu zależnym najczęściej od „elektrycznej” odległości od miejsca zwarcia.

Systemy zasilające są wyposażone w urządzenia zabezpieczające, służące do odłączenia zwanego obwodu od źródła zasilania. Gdy to nastąpi, napięcie, w każdym punkcie, z wyjątkiem odłączonego obwodu, powraca do wartości zbliżonej do tej, która poprzedzała chwilę wystąpienia zwarcia. Pewne rodzaje zwarć zanikają samoczynnie przed trwałym odłączeniem linii.

Załączanie dużych odbiorników, rozruchy dużych silników przyłączonych do końców długich linii zasilających, zmienność mocy (szczególnie biernej) charakterystyczna dla pewnej kategorii urządzeń i instalacji (silniki o zmiennym obciążeniu i/lub prędkości, piece łukowe, sprzęt spawalniczy itp.) może także wywołać zmiany prądu podobne w skutkach do stanów zwarciovych. Oddziaływanie tej kategorii odbiorów powinno być jednakże ograniczone do akceptowalnego poziomu poprzez warunki techniczne ich przyłączenia, zależne od aktualnego stanu sieci zasilającej, a wydawane przez jej operatora.

Czas trwania zapadu napięcia

Jest on zdeterminowany głównie szybkością działania urządzeń zabezpieczających. Są nimi bezpieczniki i wyłączniki sterowane za pomocą różnego rodzaju przekaźników. Te ostatnie mają często charakterystykę odwrotnie proporcjonalną tzn. im mniejszy prąd zwarcia (najczęściej bardziej odległe zwarcie), tym dłuższy czas wyłączenia. Podobną charakterystykę mają bezpieczniki. Charakterystyki i nastawy obydwu rodzajów urządzeń zabezpieczających są stopniowane i koordynowane tak, aby zwarcie stwierdzone przez kilka urządzeń zabezpieczających zostało wyeliminowane w najbardziej właściwym punkcie systemu (najczęściej najbliższym miejsca zwarcia).

Czasy występowania zaburzeń powodowanych przez inne niż zwarcie czynniki sprawcze zależą od indywidualnych przypadków. Pewne rodzaje odbiorników, np. silniki, wywołują przepływ dużego prądu łączeniowego podczas powrotu napięcia po zakończeniu zaburzenia. Skutkuje to przedłużeniem czasu trwania zapadu.

Wartość zapadu napięcia

Zależna jest od „elektrycznej” odległości rozważanego punktu systemu w relacji do miejsca zwarcia i źródła (źródeł) zasilania. Im bliżej rozważanego punktu zlokalizowane jest miejsce zwarcia, tym mniejsza jest wartość napięcia resztkowego. Z drugiej strony, im bliżej źródła zasilania (ogólnie: źródła energii, którym może być także bateria kondensatorów, akumulatorów, maszyna wirująca itp.) znajduje się rozważany punkt, tym mniejsza jest redukcja napięcia podczas zaburzenia.

Połączenie uzwojeń transformatorów i odbiorników

Wartość amplitudy zapadu zależy także od rodzaju zwarcia oraz skojarzenia uzwojeń transformatora (transformatorów), znajdujących się pomiędzy miejscem zwarcia i rozważanym punktem systemu zasilającego. Fazy, które zostały poddane zburzeniu – przyczynie zapadu, oraz skojarzenie uzwojeń transformatora – to czynniki mające istotny wpływ na negatywne skutki zaburzenia.

Krótkie przerwy w zasilaniu

Działanie bezpiecznika lub wyłącznika odłącza część systemu od źródła zasilania. W przypadku radialnego systemu, oznacza to przerwę w zasilaniu dla wszystkich odbiorców poniżej punktu przerywania obwodu. W przypadku sieci oczkowej, dla eliminacji zwarcia konieczna jest przerwa w więcej niż jednym punkcie. Odbiorcy przyłączeni do odłączonego segmentu sieci doświadczą przerwy w zasilaniu.

W systemie zasilającym stosowany jest układ samoczynnego ponownego załączania (SPZ). Celem jego działania jest przywrócenie, z minimalnym czasem opóźnienia, normalnej nie zaburzonej pracy systemu w przypadku, gdy zwarcie miało przejściowy charakter. Operacja ponownego załączenia może być ponawiana kilkakrotnie (w zależności od przyjętej praktyki eliminacji zwarć), aż do samoczynnej eliminacji zwarcia lub do pozostawienia wyłącznika w stanie otwartym, jeżeli zwarcie ma charakter trwały. Należy zauważyć, że każda operacja łączenia systemu SPZ na zwarty obwód daje w rezultacie zapad napięcia.

3. SKUTKI ZAPADÓW NAPIĘCIA I KRÓTKICH PRZERW W ZASILANIU

Podczas trwania zaburzenia, źródła zasilania, które w normalnych warunkach dostarczają energię do urządzenia nie wypełniają swojej funkcji, lub wypełniają ją w ograniczonym zakresie. Redukcja napięcia lub jego zanik powoduje, że sprzęt nie otrzymuje ilości energii potrzebnej do prawidłowego funkcjonowania. Prowadzi to w konsekwencji do degradacji jego pracy, w krańcowym przypadku do przerwy w działaniu. Często stosowane są układy zabezpieczające, które odłączają zasilanie, gdy napięcie zmniejszy się poniżej zadanego poziomu. Takie zabezpieczenie może zmienić zapad napięcia w długą przerwę w zasilaniu. Nie jest ona bezpośrednio spowodowana zapadem, lecz jest efektem zamierzonego, planowego działania urządzeń zabezpieczających.

Odbiornik może zostać odłączony przez układy zabezpieczające lub jego praca może być niewłaściwa, jeżeli napięcie osiągnie zbyt małą wartość lub jeżeli zapad będzie trwał zbyt długo. Efekty takiego przypadku mogą być bardzo znaczące z ekonomicznego punktu widzenia.

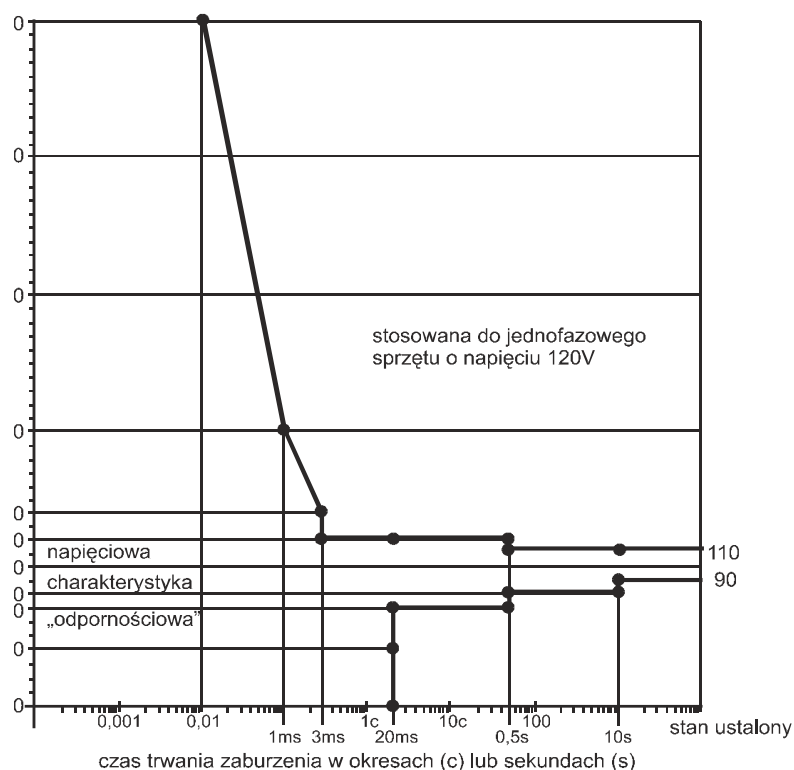
Sprzęt informatyczny/układy sterowania

Układy mikroprocesorowe stosowane obecnie powszechnie do sterowania złożonych procesów technologicznych są wyjątkowo czułe na zapady napięcia. Nieprawidłowości ich pracy mogą spowodować przerwanie procesu, nawet jeżeli np. napędy i inny „siłowy” sprzęt jest odporny na te zaburzenia. Najpowszechniej występującymi skutkami są: brak transmisji sygnałów lub błędy

w ich przekazie. Większość sprzętu informatycznego ma wbudowane detektory uszkodzeń i zewnętrznych zaburzeń w celu ochrony danych w wewnętrznej pamięci (w tym również programowo zapisaną procedurę reakcji na zapady i krótkie przerwy w zasilaniu, gwarantującą zachowanie danych i poprawną pracę po powrocie napięcia) lub ze względów bezpieczeństwa (brak transmisji lub błędne rozkazy w przypadku sterowania dużymi procesami).

Ten rodzaj sprzętu jest bardziej czuły na stopniowe zmiany napięcia (zmniejszanie) niż na nagłą przerwę zasilania. Niektóre detektory uszkodzeń nie reagują dostatecznie szybko na stopniowe zmniejszanie napięcia zasilającego. Wówczas stałe napięcie wyjściowe zasilaczy może zmniejszyć się do poziomu niższego niż minimalne dopuszczalne napięcie pracy, zanim detektor uszkodzenia zostanie pobudzony. W efekcie dane będą utracone lub błędne. Po powrocie napięcia sprzęt taki może nie być zdolny do poprawnego ponownego startu i może wymagać przeprogramowania. Z tego powodu dla sprzętu informatycznego podano w przedmiotowych standardach szczegółowe procedury testowania odporności na omawiany rodzaj zaburzenia. O odporności sprzętu komputerowego na zmiany wartości skutecznej napięcia informuje tzw. charakterystyka ITIC (dawniej CBEMA), przedstawiona na rys. 3. Na osi poziomej zaznaczony jest czas występowania zaburzenia w ms i okresach przebiegu składowej podstawowej napięcia, natomiast na osi pionowej – wartość skuteczna napięcia wyrażona w procentach napięcia znamionowego. Widać wyraźnie, że odporność sprzętu (gwarantowana dla zaburzeń zawartych pomiędzy gałęziami charakterystyki) silnie zależy od czasu trwania zapadu. Zgodnie z tą charakterystyką, sprzęt informatyczny (komputery, elementy sieci komputerowych itp.) powinien być zdolny do tolerowania ustalonych zmian napięcia zawartych w przedziale 90–110% wartości znamionowej.

Sterowanie realizowane przez programowalne sterowniki logiczne PLC można przedstawić w postaci czterech podstawowych kroków funkcjonalnych: czytanie danych wejściowych (moduł wejściowy); rozwiązywanie programu sterowania (CPU); samodiagnostyka (CPU); modyfikacja stanów wyjść zgodnie z programem (moduł wyjściowy). Zapady napięcia mogą oddziaływać na CPU, karty I/O i także na poziomy logiczne PLC podczas realizacji każdego z wyróżnionych kroków. Każde z tych potencjalnych miejsc zakłócenia może przerwać ciągłość całego procesu technologicznego. Czas cyklu, czyli czas potrzebny do realizacji wszystkich czterech kroków, może nie przekraczać kilkunastu ms, a więc może być współmierny z czasem występowania zaburzeń.



Rys. 3. Charakterystyka ITIC dla sprzętu informatycznego

Jednym ze „słabszych” elementów w PLC jest jego zasilacz. Jest to typowy układ zasilany napięciem przemiennym, które przekształca (najczęściej impulsowo) w napięcie stałe, zasilające pozostałe elementy PLC. Odporność zasilacza zależy głównie od wymaganego stopnia stabilizacji stałego napięcia wyjściowego oraz od energii zgromadzonej w jego kondensatorach.

Niekiedy urządzenia I/O są lokalizowane w pobliżu urządzeń wykonawczych, w celu minimalizacji wymaganego okablowania, pracując np. jako koncentratory danych. Wówczas krytycznymi punktami stają się również ich zasilacze, tym bardziej, że w większości instalacji CPU ma najczęściej gwarantowane bezprzerwowe zasilanie realizowane za pomocą UPS, natomiast nie zawsze jest tak w przypadku koncentratorów.

System I/O tworzy interface pomiędzy urządzeniami peryferyjnymi – zewnętrznymi, a sterownikiem. Wejściowe urządzenia, tj. przyciski, czujniki są hardwerowo połączone z sterownikiem. Powszechny jest dyskretny charakter wejść. Napięcia progowe, na podstawie których ustalona jest wartość sygnału logicznego – 0 lub 1 – nie są normalizowane. Na przykład jeżeli zapad napięcia spowoduje w czasie kilku okresów obniżenie wartości sygnału wejściowego, może wyniknąć problem właściwego rozpoznania stanu logicznego.

W każdym układzie sterownika istnieje przycisk awaryjnego zatrzymania linii. Bywa on też niekiedy przyczyną niepożądanych wyłączeń, jeżeli jest skonfigurowany w taki sposób, że zapad napięcia może wywołać działanie analogiczne do skutków jego celowego uaktywnienia.

Styczniki i przekaźniki

Są stosowane do łączenia lub rozłączania zarówno obwodów mocy jak i sterowania. Niezależnie od aplikacji występuje zawsze problem, gdy stycznik/przekaźnik rozłączy się w sposób nieplanowany podczas zaburzenia elektromagnetycznego. Prowadzi to zwykle do niekontrolowanego przerywania procesu. Wielu wytwórców podaje, że ich styczniki odpadają przy 50% napięcia znamionowego U_N , jeżeli te warunki trwają dłużej niż jeden okres. Te dane zmieniają się w zależności od producenta, lecz w praktyce nieprawidłowość ich działania występuje często już przy 70% U_N lub więcej.

Silniki asynchroniczne

Są z reguły zabezpieczone swoją inercją (oraz inercją napędzanego agregatu) przed skutkami krótkich zmian napięcia, z wyjątkiem zapadów lub przerw o większych wartościach (amplitudy i czasu trwania), które mogą spowodować niepożądane zaburzenia w ich pracy. W efekcie zapadu następuje początkowo redukcja wartości momentu elektromagnetycznego i w konsekwencji zmniejszenie prędkości. Ustala się nowy punkt równowagi pomiędzy momentem silnika (osiągany przy większym prądzie) i momentem obciążenia. Zapad o amplitudzie mniejszej niż około 30% nie ma najczęściej w praktyce znaczącego wpływu na pracę silnika asynchronicznego. Moment silnika podczas takich zaburzeń jest z reguły większy lub równy momentowi obciążenia. Przeciwnie, dla większości zapadów napięcia o amplitudzie większej niż 30% moment silnika może być mniejszy niż moment obciążenia. Wówczas silnik redukuje prędkość, a stopień redukcji zależy od amplitudy i czasu trwania zapadu, podobnie jak od inercyjności wirującego systemu.

Ponowny rozruch po zaniku zaburzenia wymaga, podczas wzrostu prędkości, dużego prądu i powoduje wydłużenie czasu zapadu (ponad czas zaburzenia). Jest to rezultat obniżenia napięcia na skutek dużej wartości prądu, co utrudnia lub niekiedy może nawet uniemożliwić ponowny rozruch. Wartość prądu jest tym bliższa prądowi rozruchu, im większy poślizg wystąpił na końcu zapadu.

Silniki synchroniczne

W przemyśle są stosowane prawie wyłącznie jako układy napędowe o stałej prędkości. Ze względu na ich moc zasilane są z sieci SN. W zależności od amplitudy i czasu trwania zaburzenia skutkiem może być przejściowe przetężenie prądowe i w granicznym przypadku utrata synchronizmu. Wówczas musi być przeprowadzony złożony proces ponownego rozruchu.

Maszyna synchroniczna może tolerować krótkotrwale większe zmiany napięcia (o amplitudzie nawet do 40%) ze względu na: inercję związaną z jej zazwyczaj dużą mocą, możliwość przewzbudzenia i proporcjonalność momentu silnika do napięcia w pierwszej potęgze. Praca silnika synchronicznego jest definiowana na wyjściu przez moment i prędkość, a na wejściu – przez napięcie i moc czynną. Strumień, moc czynna i kąt mocy silnika są zmiennymi sprzężonymi z napięciem i momentem. Redukcja napięcia może prowadzić do ustalenia nowego stabilnego punktu pracy w reakcji na zapad napięcia.

Wzrost odporności tych maszyn można uzyskać przez: ustalenie właściwego poziomu pobudzenia zabezpieczenia prądowego tak, aby dopuszczało ono większe przeciążenia oraz zagwarantowanie odpowiedniego, regulowanego prądu wzbudzenia utrzymującego maszynę w stanie synchronizmu.

Regulowane napędy elektryczne

Stanowią jeden z największych problemów, jeżeli chodzi o zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu. Są szczególnie czułe na ten rodzaj zaburzenia, a ich często znaczące moce jednostkowe czynią wszelkie sposoby redukcji skutków problemem

trudnym technicznie i najczęściej kosztownym. Problem dotyczy nie tylko negatywnych efektów oddziaływania na napędy, lecz także oddziaływania na całe elektromagnetyczne i technologiczne środowisko, którego są częścią składową. Skutek jest natychmiastowy, nie tak jak dla innych rodzajów zaburzeń, np. harmonicznych, asymetrii itp.

W ich przypadku charakteryzowanie zapadu napięcia jedynie w układzie współrzędnych: amplituda zapadu-czas trwania jest często zbyt dużym uproszczeniem, mimo, że jest to powszechny sposób opisu i podstawowy cel pomiarów. Nie uwzględnia on bowiem różnic wartości poszczególnych napięć fazowych (asymetrii tych napięć) i występującej także podczas zapadu zmiany ich kątów fazowych. Dodatkowo ta uproszczona charakterystyka nie uwzględnia również niesinusoidalnej natury przebiegu napięcia podczas zaburzenia.

Napędy prądu stałego i przemiennego reagują różnie na zapady napięcia, różnią się bowiem topologią części siłowej i układami sterowania (zarówno oprogramowaniem, jak i sprzętem). Istnieją trzy główne przyczyny, które sprawiają, że napędy są czułe na zapady napięcia.

Pierwsza, to zasilanie układu sterowania napędu. Jeżeli zasilacze nie są w stanie zapewnić wystarczającego poziomu napięcia, wówczas napęd musi być wyłączony, ze względu na groźbę utraty kontroli nad jego pracą.

Druga grupa problemów dotyczy możliwych nieprawidłowości w pracy lub nawet groźby wystąpienia stanu awaryjnego w części siłowej układu w następstwie zaburzenia (np. przerzut falownikowy w napędzie prądu stałego).

Trzecią przyczyną jest fakt, że wiele procesów, ze względów technologicznych, nie toleruje utraty precyzyjnej kontroli prędkości lub momentu nawet przez bardzo krótki okres czasu.

Reakcja napędu na zapad napięcia jest, prócz wielkości opisujących zaburzenie, także funkcją rodzaju (typu) obciążenia oraz parametrów napędu. Pewne procesy (układy wentylatorów, dmuchaw itp.) mogą tolerować nawet znaczące zmniejszenie prędkości i momentu silnika. Inne takich zmian nie dopuszczają. Wiele procesów przemysłowych wymaga precyzyjnej i dokładnej kontroli parametrów, jak ciśnienie, temperatura, przepływ. Ponieważ większość tych procesów jest napędzana przez silniki elektryczne, moment i prędkość silnika bezpośrednio wpływają na zmienne procesu.

Lampy wyładowcze

W przypadku popularnego obecnie typu oświetlenia – wysokoprężnych lamp sodowych, przerwa w zasilaniu o czasie trwania około 2 okresów lub zapad do wartości 45% napięcia znamionowego powoduje zgaśnięcie lampy. Musi upłynąć czas, od jednej do kilku minut po to, aby lampa mogła ostygnąć i aby mógł nastąpić jej ponowny zapłon. W przypadku lamp wyeksploatowanych wystarczy zapad o znacznie mniejszym napięciu resztkowym (np. do 85% U_N), aby lampa zgasła.

4. SPOSOBY POPRAWY

Standardowe podejście do kompatybilności elektromagnetycznej polega na koordynacji dopuszczalnych poziomów emisji i odporności. Z jednej strony podejmowane są działania zmierzające do ograniczenia wytwarzanych zaburzeń elektromagnetycznych, tak aby nie przekroczyły one zadanych poziomów. Z drugiej strony dąży się do tego, aby sprzęt i instalacje poddane wpływowi tych zaburzeń wypełniały swoje funkcje, czyli miały wystarczający poziom odporności.

W przypadku zapadów napięcia, definiowanych w dwuwymiarowym układzie współrzędnych: napięcie resztkowe (amplituda)-czas trwania, dopuszczalne poziomy emisji i odporności muszą być określone dla obydwu współrzędnych.

Napięcie resztkowe zmienia swą wartość w przedziale od zera do bliskiej znamionowej, w zależności od względnego położenia rozważanego punktu sieci, miejsca zwarcia i źródeł generacji energii.

Czas trwania zapadu jest w dużym stopniu zależny od szybkości, z jaką eliminowane jest zwarcie. Niezbędną cechą zabezpieczeń przeciwzwarciowych jest gradacja czasów zadziałania wyłączników, przekładników itp., w celu odłączenia zwarcia w najbardziej odpowiednim punkcie systemu zasilającego. Oznacza to, że czas eliminacji zwarcia, a w konsekwencji czas trwania zapadu i krótkiej przerwy w zasilaniu zależy od miejsca, w którym wystąpiło zwarcie.

Istnieją więc ograniczone możliwości wpływania na poziom zaburzenia. Można natomiast w pewnym stopniu zmniejszać częstotliwość jego występowania, poprzez zwiększenie, w różny sposób, odporności sieci zasilającej na zwarcia.

Pewne urządzenia i instalacje mają zwiększoną odporność na zapady napięcia dzięki własnej inercyjności lub zgromadzonej w nich energii. Taką cechę można im nadać już na etapie projektowania.

Wśród technicznych działań zmierzających do zmniejszenia negatywnych skutków eliminacji zapadów i krótkich przerw w zasilaniu można wyróżnić: (1) redukcję liczby zwarć, (2) redukcję czasu eliminacji zwarć, (3) zmianę konfiguracji systemu zasilającego,

(4) włączenie specjalnych urządzeń pomiędzy sieć zasilającą i zaciski czułego sprzętu (stabilizatorów napięcia), (5) zwiększenie odporności urządzeń.

Redukcja liczby zwarć

Całkowita eliminacja zwarć nie jest oczywiście możliwa. Istnieją jednakże sposoby pozwalające zasadniczo zmniejszyć ich liczbę, a w konsekwencji także częstość występowania zapadów napięcia oraz przerw w zasilaniu. Jest to bardzo efektywny sposób poprawy jakości zasilania i wielu odbiorców sugeruje jako oczywisty ten rodzaj działań w przypadku występowania rozważanych zaburzeń. Przykładami są: (1) zastępowanie linii napowietrznych liniami kablowymi, (2) stosowanie izolowanych przewodów w liniach napowietrznych, (3) stosowanie regularnej przycinki drzew w strefie linii, instalowanie osłon przed zwierzętami, (4) ekranowanie przewodów napowietrznych poprzez instalowanie dodatkowych przewodów ekranujących, (6) zwiększenie poziomu izolacji, instalowanie liniowych odgromników, (7) zwiększenie częstości remontów i przeglądów technicznych, mycie izolatorów itp.

Redukcja czasu eliminacji zwarcia

Nie oznacza zmniejszenia liczby zwarć, lecz tylko złagodzenie ich skutków. Nie wpływa także na liczbę lub czas trwania przerwy w zasilaniu. Ten ostatni jest bowiem zależny jedynie od szybkości z jaką następuje powrót zasilania. Szybka eliminacja zwarcia nie wpływa także na liczbę zapadów napięcia, lecz może znacząco ograniczyć czas ich trwania.

Podstawowy sposób redukcji czasu zwarcia polega na stosowaniu bezpieczników z ograniczeniem prądu. Są one zdolne do eliminacji zwarcia w czasie jednego półokresu. Zmniejszenie prądu zwarcia i skrócenie czasu jego występowania zasadniczo ogranicza czas trwania zapadu napięcia (rzadko więcej niż jeden okres).

Zmiana konfiguracji systemu zasilającego

Dzięki tym działaniom można uzyskać redukcję „ostrości” zjawiska, lecz dużym kosztem, szczególnie w systemach WN. Podstawową metodą przeciwdziałania zwarciom jest instalacja elementów redundancji. Do tych metod, szczególnie odpowiednich dla zapadów napięcia, należą:

- instalowanie generatorów w pobliżu czułych odbiorów. Podtrzymują one napięcie podczas odległych zwarć. Redukcja napięcia jest równa procentowemu udziałowi generatora w prądzie zwarcia. W przypadku instalowania elektrowni, np. pracującej w skojarzeniu, warto również w tym aspekcie rozważyć jej lokalizację;
- zwiększenie liczby szyn i rozdzielni w celu ograniczenia ilości odbiorców, którzy mogą potencjalnie doświadczyć skutków zaburzenia;
- instalowanie dławików zwarciovych w strategicznych punktach systemu, w celu zwiększenia „elektrycznej” odległości od miejsca zwarcia. Nie należy jednakże zapominać, że to działanie może zapad napięcia uczynić większym dla innych odbiorców;
- zasilanie szyn z czułymi odbiorcami z kilku rozdzielni. Zapad napięcia w jednej będzie redukowany poprzez wpływ pozostałych. Im bardziej niezależne są te rozdzielnie, tym działanie jest skuteczniejsze. Najlepszy efekt redukcji można osiągnąć poprzez zasilanie z dwóch różnych systemów przesyłowych. Wprowadzenie drugiego zasilania zwiększa liczbę zapadów, lecz redukuje ich wartość (czas i amplitudę).

Liczba krótkich przerw może być zmniejszona poprzez przyłączanie mniejszej liczby odbiorców do jednego wyłącznika (innymi słowy: zwiększenie liczby wyłączników).

Instalowanie stabilizatorów napięcia

Najpowszechniejszym sposobem redukcji skutków rozważanych zaburzeń jest stosowanie dodatkowych urządzeń – stabilizatorów napięcia. Mogą być instalowane zarówno po stronie dostawcy, jak i odbiorcy energii, lecz praktyka pokazuje, że znacznie częściej stosuje je ten ostatni. Poprawa warunków zasilania oraz zwiększanie odporności sprzętu są bowiem poza kontrolą odbiorcy.

Układy te można określić wspólnym mianem – układów o podwyższonych wskaźnikach energetycznych (UPPE). W tej grupie istnieje ogromna różnorodność rozwiązań szczegółowych.

Działanie takich urządzeń, przyłączanych pomiędzy zaburzone źródło zasilania i czuły sprzęt, polega w swej istocie na szybkim dostarczeniu energii z alternatywnego źródła lub na adaptacji trybu ich pracy do krótkiej przerwy lub do ograniczonej wartości dostarczanej energii, gwarantując równocześnie krytycznemu odbiornikowi poprawne warunki zasilania.

Można mówić o dwóch rodzajach stosowanych rozwiązań technicznych. Są nimi:

- **układy gromadzące energię;** jest ona następnie wykorzystywana do zasilania krytycznego sprzętu podczas zaburzenia. Mogą być stosowane w przypadku zapadów napięcia o dowolnej wartości napięcia resztkowego, a także podczas przerw w zasilaniu. Poziom odporności sprzętu jest wówczas uzależniony od wartości zgromadzonej energii i wymagań energetycznych chronionego procesu. W wielu przypadkach należy rozważać jako krytyczny, także czas reakcji urządzenia kompensującego zaburzenie. Ponieważ proces gromadzenia energii jest z reguły bardzo kosztowny, stosowany jest w odniesieniu do tych urządzeń, które są szczególnie czułe. Przykładami tych rozwiązań mogą być: bezprzerwowe układy zasilające (UPS), nadprzewodnikowe zasobniki energii elektrycznej (SMES – ang. *Superconducting Magnetic Energy Storage*), układy z kołem zamachowym, zespoły silnik-generator;
- **układy nie mające możliwości gromadzenia energii;** mogą być stosowane jedynie w celu redukcji skutków zapadów (nawet do 50%), lecz nie przerw w zasilaniu. Różnią się pomiędzy sobą wartością zapadu napięcia, który może być przez nie kompensowany. W tych rozwiązaniach czas trwania zapadu nie jest krytycznym parametrem. Ich koszt jest z reguły mniejszy niż rozwiązań gromadzących energię. Przykładami takich rozwiązań mogą być:
 - transformatory stabilizujące (w tym także ferorezonansowe);
 - energoelektroniczne układy szybkiego przełączania źródeł zasilania – FTS (ang. *Fast Transfer Switching*);
 - statyczne generatory prądów i napięć podstawowej harmonicznej, tj.:
 - układy szeregowe (DVR – ang. *Dynamic Voltage Restorer*). Prócz stabilizacji napięcia uzyskiwanej poprzez włączenie szeregowego źródła napięcia pomiędzy krytyczny odbiornik a zaburzone źródło zasilania, układy te mogą także wpływać na wartość reaktancji zastępczej sieci elektroenergetycznej, pełnić funkcję przesuwników fazowych, symetryzować, eliminować w aktywny sposób odkształcenie napięcia na zaciskach odbiornika itp.;
 - układy równoległe: statyczne kompensatory (SVC – ang. *Static VAR Compensator*) wpływające na wartość i charakter (indukcyjny lub pojemnościowy) pobieranej mocy biernej, tym samym powodujące redukcję lub wzrost napięcia w rozważanym punkcie systemu zasilającego.
 - układy szeregowo-równoległe: uniwersalne kontrolery przepływu mocy.

5. POPRAWA ODPORNOŚCI SPRZĘTU

Jednym z rozwiązań, najkorzystniejszych ze względów technicznych i ekonomicznych, jest stosowanie urządzeń o dostatecznym poziomie odporności, właściwym dla środowiska do pracy, dla którego są one przeznaczone. Jest to efektywna metoda eliminująca niepożądane wyłączenia będące skutkiem zapadów napięcia (w mniejszym stopniu przerw w zasilaniu). Coraz częściej odporność na określoną wartość i czas zapadu staje się podstawą oferty producenta, przesądzającą o jego komercyjnym sukcesie. Korzystne byłoby, aby producenci powszechnie określali w opisie danych technicznych produktu stopień jego odporności na zapady napięcia. Należałoby również wytypować pewne rodzaje odbiorników, które są szczególnie czułe i krytyczne, ze względu na skutki ich błędnego zadziałania, i te urządzenia w pierwszej kolejności wyposażyć w odpowiednie zabezpieczenia. Przed przyłączeniem czułego urządzenia należy ocenić poziom jego kompatybilności z siecią zasilającą. Możliwa procedura postępowania obejmuje trzy etapy:

- uzyskanie informacji o pracy systemu: spodziewanej liczbie zapadów i ich charakterystyk. Jest kilka sposobów uzyskania takich danych: kontakt z dostawcą energii, monitorowanie zasilania w dłuższym okresie czasu, analiza zwarć itp. Dla uzyskania wiarygodnych informacji potrzebny jest pomiar zapadów w długim okresie czasu. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie statystycznych metod predykcji: wykorzystując model systemu oraz informacje dotyczące statystyki zwarć w różnych jego punktach można określić spodziewaną liczbę zwarć dla każdego szyn. Metody te nie wymagają długiego czasu, szybko dają końcowy rezultat. Są tak dokładne, jak dokładny jest stosowany model oraz dane wejściowe;
- uzyskanie informacji o czułości sprzętu. Można je uzyskać od producenta, poprzez przeprowadzenie testów lub przyjmując typowe charakterystyki czułości. W praktyce odbiorca często dowiaduje się o ograniczonej odporności urządzenia już po jego zainstalowaniu;
- określenie potencjalnego skutku. Jeżeli dwie poprzednie informacje są dostępne, istnieje możliwość oceny potencjalnej groźby awarii sprzętu (częstości) oraz oceny ekonomicznego skutku ich wystąpienia. Na tej podstawie można wybrać metodę postępowania: poprawę warunków zasilania, lepszy (mniej czuły) sprzęt, zastosowanie stabilizatora lub akceptacja istniejącej sytuacji.

W praktyce trudno jest uzyskać informacje od energetyki zawodowej oraz od producenta sprzętu. Jest wiele przyczyn tego stanu. Jedną z nich jest stosowany bardzo różny, trudny do porównania opis zjawiska (brak znormalizowanego formatu charakterystyki), producenci dotychczas rzadko przeprowadzają takie badania. Ich stan wiedzy na temat charakterystyk odpornościowych sprzętu na skok np. fazy napięcia podczas zapadu, czy niesymetryczny zapad, jest najczęściej bardzo ograniczony.

Ze względu na fakt, że różne kategorie urządzeń różnie reagują na zapady, nie jest możliwe opracowanie i stosowanie jednego standardu definiującego czułość sprzętu stosowanego np. w przemyśle. Najbliższa unifikacji jest charakterystyka CBEMA i jej późniejsze modyfikacje.

Skutki zapadów i przerw w zasilaniu powinny być wzięte pod uwagę na etapie konstruowania urządzenia, istnieje bowiem możliwość projektowania i produkcji sprzętu bardziej odpornego na omawiany rodzaj zaburzenia. Posiadanie podanych powyżej informacji pozwala zastosować właściwe, z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia (bez ponoszenia nadmiernych kosztów), sposoby uzyskania właściwego stopnia odporności.

6. POMIAR ZAPADÓW NAPIĘCIA I KRÓTKICH PRZERW W ZASILANIU

Do oceny jakości zasilania, ze względu na zapady napięcia i krótkie przerwy, należy zrealizować następującą, pięciostopniową procedurę:

ETAP 1 – pomiar wartości chwilowej napięcia z odpowiednią częstotliwością próbkowania (typowo 128 lub 256 próbek w okresie) i rozdzielczością określoną liczbą bitów stosowanych dla zapamiętania pojedynczej próbki.

ETAP 2 – wyznaczanie, na podstawie „spróbkowanego” napięcia, charakterystyki zaburzenia jako funkcji czasu.

ETAP 3 – wyznaczenie wskaźników opisujących pojedyncze zaburzenie.

ETAP 4 – wyznaczanie, na podstawie wskaźników pojedynczych zapadów, wskaźników dla wszystkich zaburzeń, które wystąpiły w danym przedziale czasu.

ETAP 5 – wyznaczanie wskaźników opisujących zaburzenia dla danego systemu lub określonej jego części.

Wszystkie napięcia dotyczące zapadów są wartościami skutecznymi, wyznaczonymi dla minimum połowy okresu składowej podstawowej napięcia zasilającego (10 ms dla 50 Hz). Najczęściej wartość zapadu określana jest w dwojaki sposób, jako: (1) minimalna wartość, którą przyjmuje napięcie podczas zaburzenia (napięcie resztkowe), (2) wartość, o którą napięcie zmaleje w stosunku do napięcia referencyjnego. Coraz częściej w dokumentach normalizacyjnych stosowany jest pierwszy wskaźnik – staje się on powszechny, lecz nie jest jeszcze obowiązujący.

Mierzone są więc: wartość napięcia, czas trwania zapadu oraz liczba zaburzeń w przyjętym okresie rejestracji. Dwa ostatnie parametry są także rejestrowane dla przerw w zasilaniu.

Aby uzyskać porównywalność otrzymanych wyników, niezbędne jest podjęcie pewnych arbitralnych decyzji pomiarowych. Poniżej przedstawiono, dla celów informacyjnych (nie są to rekomendacje) decyzje, które zostały podjęte w wybranych zrealizowanych projektach pomiarowych, których wyniki zostały opublikowane.

Napięcie referencyjne dla celów pomiarowych

Napięcie resztkowe jest zwykle wyrażane w jednostkach względnych lub w procentach, w odniesieniu do napięcia znamionowego lub deklarowanego w rozważanym punkcie systemu. Jest to stosowane szczególnie w sieciach nn i SN.

Zakres zmienności napięć w sieciach WN jest znacznie większy niż w sieciach nn i SN. W takich przypadkach korzystniejszy jest pomiar zapadów w odniesieniu do napięcia poprzedzającego zaburzenie. Napięciem referencyjnym jest wówczas wartość, która jest wyznaczana w sposób ciągły, w danym przedziale czasu – oknie pomiarowym – dłuższym niż czas trwania zapadu (np. 1 s).

Należy zauważyć, że wartość referencyjna napięcia w przesuwym oknie czasowym naraża na pewne trudności w prognozowaniu reakcji sprzętu, którego odporność jest często wyrażana w wartościach absolutnych. Przykładowo zapad o napięciu resztkowym $d\%$ z wartości napięcia referencyjnego wyznaczonego w przesuwym oknie może wynosić zarówno $0,9dU_N$, jak i $1,1dU_N$ (U_N – napięcie znamionowe), w zależności od wartości napięcia poprzedzającego zapad. Nie jest to więc wystarczająco precyzyjna informacja, aby przewidzieć reakcję sprzętu na rozważane zaburzenie.

Czas trwania zapadu – wartości progowe początku i końca zaburzenia

Wybór wartości progowych jest zależny od rodzaju napięcia referencyjnego: czy jest ono wyznaczane w przesuwym oknie, czy też jego wartość jest stała.

Rozróżnienie pomiędzy zapadami napięcia i krótkimi przerwami w zasilaniu

Pojęcie „przerwa” oznacza całkowite odizolowanie od wszystkich źródeł zasilania i zero napięcia. W praktyce jednakże izolowana część systemu może zawierać źródła o znaczącej energii zmagazynowanej w różnej formie, co sprawia, że napięcie nie osiąga wartości zerowej podczas bardzo krótkich przerw. Prócz tego, teoretycznie największe zapady napięcia mogą osiągnąć zerową wartość napięcia resztkowego. Taki zapad jest rzeczywistą przerwą, mimo że połączenie ze źródłami zasilania nadal istnieje. Z tego powodu trudno jest rozróżnić za pomocą przyrządów pomiarowych, zapad napięcia od krótkiej przerwy w zasilaniu. Niezbędne jest więc wprowadzenie pewnego kilkuprocentowego napięcia granicznego (np. 1, 5, 10% – rozdział 9.9), umożliwiającego rozróżnienie tych dwóch zaburzeń. Przykładowo, zwarcie może spowodować w różnych punktach systemu niezależnie zapady i krótkie przerwy w zasilaniu w zależności od tego, czy zarejestrowane napięcie jest mniejsze lub większe od wybranej wartości granicznej.

Pomiar zapadów napięcia

Większość zapadów ma prosty kształt – napięcie maleje do pewnej mniej więcej stałej wartości i następnie po pewnym czasie wraca do poprzedniego poziomu. Można wówczas założyć, że kształt jest w przybliżeniu prostokątny. W tym przypadku napięcie resztkowe podczas zapadu jest najmniejszą wartością, do której napięcie zmalało podczas zaburzenia. Wówczas para liczb – napięcie resztkowe i czas trwania – stanowią jego pełny opis.

W przypadku złożonych, nieprostokątnych zapadów, podczas których napięcie przyjmuje kilka poziomów wartości, opisanie takiego zaburzenia przez minimalne napięcie resztkowe oraz zdefiniowany wcześniej czas trwania może być niekiedy bardzo dużym jego „przewymiarowaniem”.

Klasyfikacja wyników pomiarów

Dwuwymiarowy charakter opisu zaburzenia sugeruje dwuwymiarową macierz lub tablicę z wierszami zawierającymi wartości napięcia resztkowego i kolumnami zawierającymi czas trwania zaburzenia.

Tablica 1. Klasyfikacja zapadów napięcia – wersja 1

Czas trwania \ Napięcie resztkowe u [%]	10 ms $\leq t < 20$ ms	20 ms $\leq t < 100$ ms	100 ms $\leq t < 500$ ms	500 ms $\leq t < 1$ s	1 s $\leq t < 3$ s	3 s $\leq t < 20$ s	20 s $\leq t < 60$ s	60 s $\leq t < 180$ s
$90 > u \geq 85$								
$85 > u \geq 70$								
$70 > u \geq 40$								
$40 > u \geq 10$								
$10 > u \geq 0$								

UWAGA 1: Wyniki pomiarów w pierwszej kolumnie i pierwszym wierszu są odpowiednio zwiększone przez przepięcia i zmiany obciążenia

Tablica 2. Klasyfikacja zapadów napięcia – wersja 2

Czas trwania \ amplituda u^* [%]	10 ms $\leq t < 20$ ms	20 ms $\leq t < 100$ ms	100 ms $\leq t < 500$ ms	500 ms $\leq t < 1$ s	1 s $\leq t < 3$ s	3 s $\leq t < 20$ s	20 s $\leq t < 60$ s	60 s $\leq t < 180$ s
$u^* \geq 10$								
$u^* \geq 15$								
$u^* \geq 30$								
$u^* \geq 60$								
$u^* \geq 90$								

UWAGA 1: Wyniki pomiarów w pierwszej kolumnie i pierwszym wierszu są odpowiednio zwiększone przez przepięcia i zmiany obciążenia.

Na podstawie doświadczeń europejskiej energetyki UNIPEDe zaproponowało sposób klasyfikowania zaburzeń w formie dwóch alternatywnych tablic – 1 i 2, wyznaczanych dla zadanego przedziału czasu np. 30 dni, ½ roku, rok itp. Podobne tablice są stosowane przy sporządzaniu raportów z pomiarów przeprowadzonych w wielu punktach. Wówczas każda kratka tablicy może zawierać: (1) percentyl (najczęściej 95%) z wszystkich zarejestrowanych zaburzeń, (2) maksymalną wartość spośród zarejestrowanych zaburzeń, (3) średnią liczbę zarejestrowanych zaburzeń, (4) inne dane statystyczne.

W przypadku gdy pomiary są przeprowadzane w różnych sieciach (kablowych, napowietrznych, mieszanych, nn, SN, WN itp.), tablice mogą być sporządzane oddzielnie dla każdej z nich.

7. METODY ANALIZY

Analiza statystyczna z reguły wymaga informacji o systemie zasilającym w postaci jego modelu oraz informacji o historii zaburzeń (możliwie jak najdłuższej). Pożądane jest posiadanie dla każdego wyłącznika w liniach przesyłowych (z możliwie długiego okresu czasu) historii jego działania w postaci danych o fizycznej lokalizacji zwarć, liczbie zaburzonych faz, impedancji zwarć i czasie ich trwania itp. W bardziej zaawansowanych przypadkach analizy uwzględniane są także modele aparatury łączeniowej oraz charakterystyki czasowe zabezpieczeń. Jeżeli takie informacje są dostępne, można dokonywać wiarygodnych analiz i prognozowania. Ich brak zmusza do czynienia pewnych założeń upraszczających, obniżających pewność prognozy.

Typowy model systemu zawiera schemat ideowy, długości i rodzaj linii zasilających (kablów czy napowietrznych), dane transformatorów i moce zwarcia w poszczególnych punktach sieci. Dane te są niezbędne dla większości analiz zwarciowych.

Do zalet metod statystycznych można zaliczyć: szybkość pozyskania informacji, dokładność określania wartości zapadów napięcia na podstawie analizy zwarciowej, możliwość wyznaczania czasu trwania zaburzenia (jeżeli uwzględniane są modele urządzeń zabezpieczających), przydatność na etapie projektowania nowych systemów.

Nie należy zapominać, że dokładność rezultatów zastosowanej metody jest determinowana dokładnością modelu. Jeżeli będzie on błędny, również otrzymane za jego pomocą estymacje będą nieprawidłowe. Drugim czynnikiem ograniczającym dokładność prognoz jest losowość zmian danych wejściowych do modelu, np. częstości występowania zwarć zależnej od sezonu, warunków atmosferycznych, praktyki eksploatacji sieci itp.

Bezpośrednie pomiary

Wymagają ciągłej rejestracji napięć w przypadku, gdy ich wartość przekroczy zadane poziomy graniczne. Pomiar prądów fazowych (uzasadniony analizą innych zaburzeń np. harmonicznych) może dostarczyć wielu istotnych informacji, np. pomóc w lokalizacji źródła zaburzenia. Jeżeli nastąpi przekroczenie wartości granicznych, rejestrowane są wartości skuteczne napięć we wszystkich kanałach pomiarowych w czasie trwania zaburzenia oraz wartości chwilowe napięć z zadanej liczby okresów poprzedzających i następujących po początku i końcu zaburzenia. Jeżeli czas trwania zaburzenia przekroczy zadany przez użytkownika przedział, wówczas – w celu ochrony zasobów pamięci przyrządu – należy rejestrować uśrednione w kilku okresach wartości skuteczne monitorowanych napięć. W przedziale uśredniania pożądana jest rejestracja wartości maksymalnej i minimalnej.

Korzystne jest, gdy pozyskane w ten sposób dane są następnie przekazywane do centralnego servera i na bieżąco przetwarzane przez odpowiednie oprogramowanie wspomagające, a rezultaty dostępne dla użytkownika **on-line**. Wymagania techniczne dotyczące przyrządów pomiarowych są typowe dla sprzętu mierzącego wartości skuteczne napięć. Szczególną uwagę należy zwrócić na dopasowanie poziomu napięć wejściowych przyrządu do wartości napięć z przetworników (przekładników, dzielników) pomiarowych oraz dopasowanie impedancji wejściowej przyrządu. Do pomiaru zapadów napięcia (ogólnie wartości napięcia) można stosować zarówno przekładniki indukcyjne, jak i dzielniki pojemnościowe.

Zalety obydwu metod, tj. analizy statystycznej i pomiarów, łączą w sobie stosowane coraz częściej metody hybrydowe, stanowiące połączenie metod analizy zwarciowej z ograniczonymi danymi pozyskanymi na drodze pomiarowej.

8. NORMALIZACJA

W tablicy 3 przedstawiono wykaz norm IEC które dotyczą zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu lub zawierają informacje na temat tych zaburzeń.

Opierając się na analizie porównawczej różnych istniejących dokumentów normalizacyjnych, rekomendacji technicznych itp., można stwierdzić, że występują w nich różnice w klasyfikowaniu i definiowaniu rozważanych zaburzeń oraz że wiele spośród nich nie zawiera jednoznacznych informacji dotyczących podstawowych parametrów, jak: (1) wartość napięcia referencyjnego,

(2) wartości progowe, (3) graniczne czasy trwania zaburzenia, (4) sposobu oceny jakości zasilania z punktu widzenia analizowanego zaburzenia (przetwarzania danych dla potrzeb kontraktowych, rodzaju agregacji itp.), (5) sposób oceny zapadu trójfazowego, (6) sposób pomiaru zaburzenia (szczegółowych wymagań dotyczących cech metrologicznych przyrządów), (7) sposób przyłączenia przyrządu pomiarowego.

9. KONTRAKT

Odbiorca finalny doświadcza skutków zapadów napięcia, których źródło jest zlokalizowane w głębi systemu, po stronie dostawcy. Ten sam odbiorca wywołuje zapady napięcia, będące skutkiem np. zwarć występujących w jego instalacjach wewnętrznych, których skutków poprzez sieć energetyki zawodowej doświadczają inni odbiorcy.

Tablica 3. Wartości amplitud i czasów trwania zapadów w różnych dokumentach normalizacyjnych, przepisach oraz publikacjach

Wielkość normowana	Amplituda	Min. czas	Maks. czas
IEC 1000-2-1	10-100%UN	0,5 okresu	kilka sek.
IEC 1000-2-2		10 ms	3 s
IEC 1000-2-5	10-99% UN	10 ms	kilka sek.
IEC 61000-2-12		10 ms	3 s
PN EN 61000-4-11	10-95% UN	0,5 okresu	kilka sek.
IEC 1000-6-1, IEC 1000-6-2	10-95% UN		
PN EN 50160	10-99% UN	10 ms	1 min
UNIPED	10-99% UN		
UIE	10-99% UN	10 ms	1 min
IEC 61000-4-30	Wszystkie wartości progowe są przedmiotem kontraktu		
IEEE Std. 1159-1995	10-90%	0,5 okresu	1 min
CENELEC	10-90%	10 ms	1min
EPRI	< 95%	1 okres	1 min

Tablica 4. Krótkie przerwy w zasilaniu

Wielkość normowana	Amplituda	Min. czas	Maks. czas
IEC 1000-2-1	zanik napięcia (100%)		1 min
IEC 1000-2-2		10 ms	60 sek. (180 sek.)
IEC 1000-2-5	mniej niż 1% UN		1 min
IEC 61000-2-12		10 ms (inf.)	60 sek. (180 sek.)
PN EN 61000-4-11 (IEC 61000-4-11)	więcej niż 95%UN 80-100%UN (praktyka pomiarowa)		1 min (inf.)
IEC 1000-6-1 IEC 1000-6-2	więcej niż 95%UN		5 sek. (inf.)
CISPR 14-2			
PN EN 50160	więcej niż 99%		3 min
UIE	więcej niż 90%		1 min
UNIPED	więcej niż 99%		
IEC 61000-4-30	wszystkie wartości progowe są przedmiotem kontraktu		
IEEE Std. 1159-1995	więcej niż 90%UN	0,5 okresu	1 min
Emerald Contract	więcej niż 90%UN	1 sek.	3 min

Kto i w jaki sposób powinien ponieść odpowiedzialność za straty spowodowane tymi zaburzeniami, które w wielu gałęziach przemysłu, np. w rafineryjnym czy chemicznym, a szczególnie w przemyśle o ciągłym procesie technologicznym, mogą być ogromne?

Odbiorca: traktuje zarówno zapady napięcia, jak i krótkie przerwy w zasilaniu jako zaburzenia wpływające na funkcjonowanie sprzętu. Różnicę pomiędzy tymi dwoma zjawiskami dostrzega na podstawie obserwacji efektów zaburzenia: czy praca sprzętu zostanie przerwana, czy oświetlenie wyłączone itp. Takie wnioskowanie może prowadzić do błędów, np. w przypadku źródeł światła zapad napięcia o amplitudzie większej niż 50% (jest to typowy próg wyłączania lamp wyładowczych) wywołuje taki sam efekt, jak krótka przerwa w zasilaniu.

Dostawca: klasyfikuje zaburzenia z punktu widzenia przyczyny. Chce ponosić odpowiedzialność jedynie za czas trwania zapadu, bowiem to zależy od niego, a głównie od jego zabezpieczeń. Nie chce odpowiadać za amplitudę zapadu, na to bowiem ma ograniczony wpływ.

Wymagania dotyczące lepszej niż standardowa jakości zasilania dla pewnej kategorii odbiorców znajdują swój wyraz w kontraktach, w których dostawca energii gwarantuje nieprzekraczalny poziom zaburzeń w sieci zasilającej w zamian za zwiększoną cenę energii.

Kryteria stosowane w tych umowach charakteryzują najczęściej jakość dostawy energii dla pewnego obszaru sieci, w zgodzie z międzynarodowymi rekomendacjami i normami.

W przypadku zapadów napięcia są one niekiedy formułowane inaczej. Dotyczący ich kontrakt jest porozumieniem zawierającym pomiędzy dostawcą energii i jej odbiorcą, traktowanym indywidualnie z uwzględnieniem charakterystyk zasilania w PWP oraz specyficznych cech klienta.

Kontrakty dotyczące zapadów napięcia są nieliczne. Dotyczą głównie sieci rozdzielczych, w bardzo rzadkich przypadkach sieci przesyłowych (w wielu krajach trwają prace nad ich sformułowaniem).

Kontrakt dotyczący zapadów napięcia powinien, prócz sformułowań ogólnych, typowych dla problematyki jakości zasilania, zawierać także postanowienia odnoszące się wyłącznie do tego rodzaju zaburzeń. Do tej kategorii postanowień należą informacje dotyczące: (1) przyjętych definicji zapadu i krótkiej przerwy w zasilaniu dla układu jedno- i wielofazowych, (2) czasu będącego podstawą oceny warunków zasilania (czas pomiarów), (3) wartości napięcia referencyjnego, (4) miejsca i sposobu przyłączenia przyrządu pomiarowego, (5) danych technicznych aparatury pomiarowej, (6) wartości progowych detekcji zaburzeń, (7) techniki raportowania wyników pomiaru, (8) stosowanej metody agregacji wyników pomiaru, (9) innych technik zastosowanych do oceny jakości zasilania, (10) granicy czasu dzielącej długie i krótkie przerwy w zasilaniu.

Czas pomiarów

W niemal wszystkich zawartych dotychczas kontraktach przyjmuje się, że względu na charakter zaburzenia, jeden rok. Wiarygodność prognozowania oparta na uzyskanych danych wzrasta wraz ze wzrostem czasu (lat) rejestracji analizowanego zaburzenia.

Wartość napięcia referencyjnego

Wartością referencyjną dla określenia progów detekcji zaburzenia jest napięcie deklarowane w kontrakcie na dostawę energii, które w sieciach nn i SN jest najczęściej równe znamionowemu. W sieciach SN i WN deklarowane napięcie może różnić się od znamionowego. W sieciach WN, jak wykazuje praktyka, korzystne dla dostawcy jest przyjęcie jako referencji wartości napięcia wyznaczonej w przesuwym oknie czasowym. Długość okna czasowego powinna być większa od czasu trwania zapadu (np. 1 min).

Miejsce i sposób przyłączenia przyrządu pomiarowego

Wybór sposobu przyłączenia (np. do napięć fazowych czy międzyfazowych) powinien być rezultatem wspólnej decyzji odbiorcy i dostawcy energii, uwzględniającej: (1) sposób zasilania czułego sprzętu, (2) miejsce przyłączenia w relacji do czułego sprzętu z uwzględnieniem obecności elementów systemu mających wpływ na transmisję zapadów, np. transformatory.

W przypadku rejestracji napięć i prądów w PWP nie jest możliwe odtworzenie warunków zasilania w sieci nn na zaciskach czułych odbiorników. Aby uzyskać taką informację, należałoby mierzyć napięcia wraz z ich fazami lub mierzyć składowe symetryczne. Wobec braku takich danych, w ogromnej większości przypadków najbardziej reprezentatywny z punktu widzenia uciążliwości zjawiska jest pomiar napięć międzyfazowych. Można oczekiwać, że pomiar międzyfazowy znacząco zredukuje (szacuje się, że nawet w pewnych warunkach do 25%) liczbę zapadów w stosunku do pomiaru napięć fazowych. Załączeniem międzyfazowym przemawia także fakt, że jest to sposób, który można zrealizować w każdych warunkach zasilania.

Dane techniczne aparatury pomiarowej

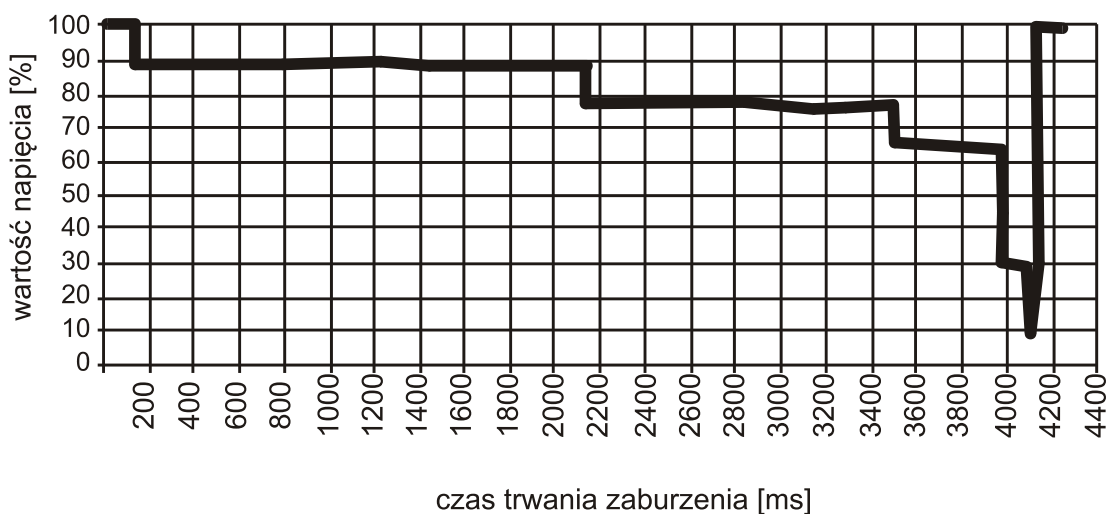
Są szczegółowo podane w normie IEC 61000-4-30: *Testing and measurement techniques – Power Quality Measurements Methods. Basic EMC publication*. Przyrządy pomiarowe stosowane dla potrzeb kontraktu powinny spełniać wymagania techniczne podane w tym dokumencie dla przyrządów klasy A.

Wartości progowe detekcji zaburzenia

Zwykle przyjmuje się 90% napięcia referencyjnego dla zapadów napięcia i 10% dla krótkiej przerwy w zasilaniu. Można przyjąć, co jest korzystne dla dostawcy, że zaburzenia są rozważane w kontrakcie jedynie w przypadku, jeżeli czas ich trwania przekroczy przyjęte wartości graniczne, np. dla przerwy w zasilaniu 1 s, dla zapadu napięcia – 600 ms (EdF).

Nie należy zapominać, że próg napięciowy ma zasadniczy wpływ na czas trwania zapadu, co zostało przedstawione na rys. 4 (także rys. 2). W zależności od przyjętej wartości progowej napięcia, czasy trwania poszczególnych zapadów przyjmują następujące wartości:

$$T_{90\%} = 4s, T_{85\%} = 2s, T_{70\%} = 600ms, T_{40\%} = 150ms, T_{10\%} = 50ms \text{ i } T_{1\%} = 0.$$



Rys. 4. Wpływ wartości progowej napięcia na czas trwania zapadu

Technika raportowania wyników pomiaru

Imperatywem staje się potrzeba opracowania takiej metody zliczania zapadów, która będzie godzić interes zarówno dostawcy, jak i odbiorcy energii, i znajdzie swój wyraz w zawieranych pomiędzy nimi kontrakcie. Dodatkowo metoda ta powinna być czytelna i jednoznaczna. W systemach trójfazowych napięcia w poszczególnych fazach są zwykle monitorowane niezależnie, obliczana jest wartość skuteczna, np. półokresowa, i na tej podstawie na końcu okresu pomiarowego otrzymywane jest zestawienie zaburzeń. Każdy przypadek zawiera informację o czasie rozpoczęcia i zakończenia oraz o amplitudzie zapadu lub napięciu resztkowym.

W wielu kontraktach dostawca gwarantuje, że zapady napięcia o amplitudzie większej niż xx (np. 70%) nie wystąpią w ciągu roku więcej niż yy (np. 15) razy. W przypadku przekroczenia tej liczby, stosuje na rzecz odbiorcy uzgodnione wcześniej opłaty kompensacyjne.

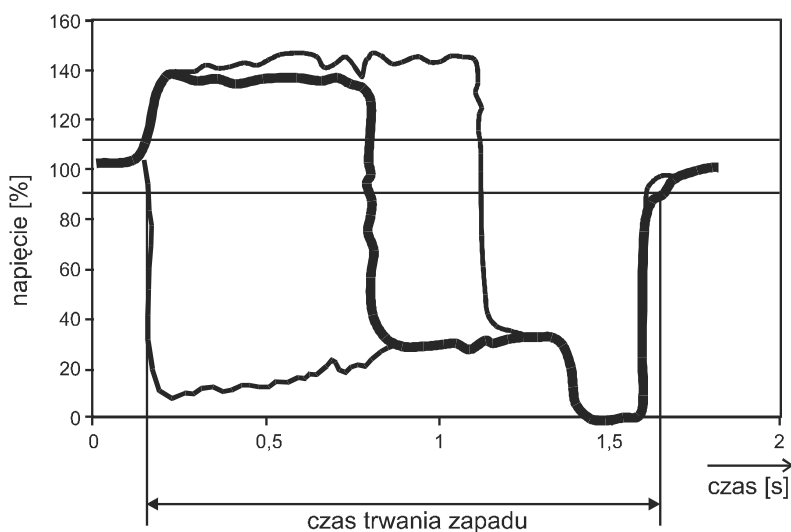
Stosowane metody agregacji wyników pomiaru

Mimo że zapady napięcia są mierzone i rejestrowane niezależnie dla każdego kanału pomiarowego, mogą być grupowane i agregowane w celu ich zliczania, zgodnie z postanowieniami kontraktu. Rozważane są różne procedury agregacji, spośród których najbardziej powszechnymi są: (1) agregacja poziomów wartości, (2) agregacja fazowa, (3) agregacja czasowa, (4) agregacja lokalizacyjna.

Agregacja poziomów wartości

Jak wykazują pomiary, ogromna większość zmian napięcia podczas zapadu ma prostokątny kształt, tzn. może być łatwo opisana dwoma współzrędnymi: amplitudą (napięciem resztkowym) i czasem trwania. Mogą wystąpić jednakże przypadki wielokrotnych zmian wartości napięcia, jak pokazano przykładowo na rys. 5. Wymaga to znacznie bardziej złożonego opisu. Dla celów kontraktowych wartością amplitudy nieprostokątnego, jednofazowego zapadu jest najczęściej maksymalna zmiana napięcia w czasie zaburzenia. Jest to metoda rekomendowana przez EPRI, UIE, CIGRE, UNIPED i przyjmowana powszechnie bez większych oporów.

Czas trwania zapadu definiowany jest jako czas, w którym napięcie jest mniejsze niż przyjęta wartość progowa. Wybór wartości progowej jest przedmiotem negocjacji pomiędzy stronami umowy.



Rys. 5. Przykładowy nieprostokątny zapad napięcia, charakteryzowany zgodnie z zaleceniami UNIPED

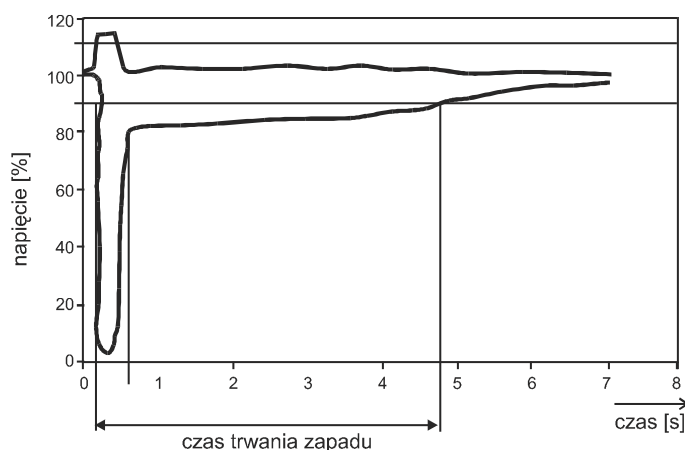
Agregacja fazowa

Polega na traktowaniu zapadów napięcia występujących równocześnie w więcej niż jednej fazie jako jedno zaburzenie opisane parą liczb: amplituda-czas trwania. W tej metodzie agregacji zapady w różnych fazach są traktowane jako równoczesne, jeżeli występują przynajmniej w jednym wspólnym oknie pomiarowym. Wymaga to synchronizacji pomiarów, np. względem dodatniego przejścia przez zero napięcia w fazie referencyjnej.

Nie ma międzynarodowego porozumienia odnośnie do sposobu opracowywania wyników pomiarów wielofazowych. Najbardziej popularny polega na wyznaczeniu maksymalnej amplitudy z traktowanych indywidualnie zapadów „fazowych” oraz czasu trwania zaburzenia jako zaczynającego się początkiem zapadu w pierwszej zaburzonej fazie, a kończącego się w chwili zakończenia zapadu w ostatniej zaburzonej fazie. Zgodnie z tą metodą, wartość amplitudy zapadu napięcia dla przykładowego trójfazowego zaburzenia, przedstawionego na rys. 5 wynosi 100%.

Metoda ta w pewnych przypadkach może nie odpowiadać naturze zaburzenia. Dodatkowo może nadmiernie karać dostawcę, jeżeli jest zapisana w kontrakcie. Przypadek taki przedstawiono przykładowo na rys. 6. UNIPED definiuje czas trwania trójfazowego zapadu jako czas, podczas którego napięcie jest mniejsze niż 90%. Zgodnie z tą definicją zaznaczono na rysunku czas trwania zapadu. Jeśli zastosować metodę UNIPED, trójfazowy zapad napięcia przedstawiony na rys. 6 będzie miał amplitudę 97% i czas trwania około 4,8 s. W rzeczywistości zmniejszenie napięcia poniżej 80% trwa tylko około 500 ms. Wiele czułych odbiorników jest odpornych na takie zaburzenia, a nie jest odpornych na zapad o amplitudzie 97%, trwający 5 s. Jest to więc interpretacja niekorzystna dla dostawcy energii.

Inne stosowane metody polegają na przyjęciu jako wartości charakteryzującej zaburzenie np. amplitudy i czasu trwania „najgorszego zapadu fazowego”, wartości średniej z amplitud zapadów w poszczególnych fazach, średniej ważonej itp.



Rys. 6. Przykład wyznaczania parametrów trójfazowego zapadu napięcia zgodnie z metodą UNIPED

Agregacja czasowa

Polega na traktowaniu sekwencji zapadów napięcia występujących kolejno z określoną przerwą czasową (w określonym przedziale czasu) jako jedno zaburzenie. Zwykle przyjmuje się jako długość dopuszczalnej przerwy pomiędzy zaburzeniami czas nie mniejszy niż cykl działania SPZ (np. 100 ms jako odległość pomiędzy kolejnymi zapadami – Francja, 1,5 min – Szwecja, 3 min – Hiszpania). Najczęściej stosuje się stały cykl obserwacji, zaczynający się początkiem zaburzenia w pierwszej fazie. Od tego momentu liczony jest czas, którego wartość uzależniona jest między innymi od sekwencji działania zabezpieczeń. W praktyce czas ten określony jest warunkami kontraktu, indywidualnie dla każdego odbiorcy. Dla przemysłu chemicznego może on wynosić nawet kilka dni. Jeżeli w tym czasie wystąpi zapad, nie ma on żadnego znaczenia, bowiem proces technologiczny i tak nie jest realizowany. Odbiorca, u którego ponowny rozruch procesu produkcyjnego trwa np. 5 h nie będzie ponosił dodatkowych kosztów związanych z zagwarantowaniem braku kolejnego zapadu napięcia w 5 minut po pierwszym, który przerwał proces. Z tej przyczyny to odbiorca powinien określić przedział czasu, który jest istotny w jego przypadku. Pojedyncze zagregowane czasowo zaburzenie może być reprezentowane przez np.: (1) amplitudę i czas pierwszego zapadu, (2) amplitudę i czas pierwszego zapadu, który spowodował lub może spowodować zakłócenie w pracy urządzeń, (3) maksymalną amplitudę i czas trwania zapadu spośród wszystkich zapadów które wystąpiły w czasie agregacji, (4) amplitudę i czas trwania zapadu o największej powierzchni itp.

Ten rodzaj agregacji jest szczególnie ważny, bowiem rezygnacja z jego stosowania mogłaby prowadzić do pogorszenia pewności zasilania na skutek zaniechania stosowania SPZ.

Należy w tym miejscu podkreślić, że ze względu na stosowane z reguły krótkie czasy agregacji, metoda ta nie fałszuje oceny powtarzalnych zapadów wywołanych np. czynnikami metrologicznymi. Wiele pomiarów wskazuje, że zapady występujące w okresie np. jednego roku koncentrują się w ogromnym procencie czasu w kilku dniach, co jednoznacznie wskazuje na ich metrologiczne źródło. Dotyczy to w szczególności sieci SN i WN z dużym udziałem linii napowietrznych.

Agregacja lokalizacyjna

Ten rodzaj agregacji oznacza grupowanie – traktowanie jako pojedyncze zaburzenie – zapadów napięcia zmierzonych równocześnie w różnych liniach zasilających tego samego odbiorcę lub w jednej rozdzielni przy wielu monitorowanych szynach. Jeżeli stosowane są poszczególne metody agregacji, tabele UNIPED mogą być stosowane bez żadnej modyfikacji. Wielkości w nich występujące będą wówczas wartościami zagregowanymi.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

- Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu są rzeczywistymi zaburzeniami występującymi w systemie elektroenergetycznym.
- Mogą wystąpić w każdym miejscu, w każdym czasie, na każdym poziomie napięcia przyjmując wartości bliskie lub równe zero i czasy powyżej 1 s. Częstość i prawdopodobieństwo ich występowania są silnie zależne od rozważanego miejsca i roku.
- Należy zauważyć, że czas większości przeprowadzonych dotychczas pomiarów nie przekraczał jednego roku. Jeśli uwzględnić silną zależność wyników pomiarów od warunków atmosferycznych i geograficznych, powstaje pytanie: jaką liczbę punktów pomiarowych i jaki czas pomiaru należy uznać za wystarczające dla wiarygodnego prognozowania rodzaju i częstości występowania zapadów napięcia? Istotne jest również pytanie dotyczące kryterium wyboru punktów pomiarowych. Nie należy zapominać, że pewne pomiary, które zostały tu przywołane, mogą być zafałszowane przez szczególne, sprzyjające lub nie, warunki pomiaru.
- W polskich warunkach należy w pierwszej kolejności zgromadzić dane o występujących zapadach. Dopiero na takiej bazie można proponować postanowienia kontraktowe, sprawdzając wcześniej skutki ich obowiązywania na danych z przeszłości.

