

Rozważania o jakości energii elektrycznej (II)

Zbigniew
Hanzelka

Jakość napięcia oczekiwana przez odbiorców nie ogranicza się tylko do ciągłości zasilania w skali np. roku, lecz coraz częściej do znacznie krótszego okresu – sekund, a nawet milisekund. Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu są traktowane obecnie jako jedne z najbardziej kłopotliwych zaburzeń elektromagnetycznych.

Na rys. 1 przedstawiono przykładowy przebieg zapadu napięcia i krótką przerwę w zasilaniu wraz z wielkościami, które charakteryzują te zjawiska w sposób ilościowy.

Definicja Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki (IEC) dyskutowana obecnie w ramach prac nad normą dotyczącą jakości energii (przyszły standard IEC 61000-4-30) określa zapad napięcia jako nagłe zmniejszenie napięcia do wartości zawartej między 90% a 10% deklarowanego napięcia U_{DEK} po którym w krótkim okresie następuje powrót do wartości deklarowanej. Napięcie deklarowane to zwykle napięcie znamionowe systemu. Jeżeli w porozumieniu

Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu są obecnie jednym z najważniejszych zagadnień w dziedzinie jakości energii elektrycznej. W artykule przedstawiono podstawowe informacje o tych zaburzeniach, ich ilościowy opis oraz przyczyny występowania. Omówiono także wynikające ich skutki na przykładzie napędów elektrycznych o regulowanej prędkości, w strukturze których wyróżniono trzy elementy o różnym poziomie odporności: aparaturę łączeniową, układ pomiarowo-sterujący oraz część energoelektroniczną. Ten rodzaj odbiornika został wybrany ze względu na powszechność stosowania w warunkach przemysłowych, szczególną czułość elementów składowych na omawiany rodzaj zaburzenia oraz znaczące ekonomiczne skutki zakłócenia jego pracy.

Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu

między dostawcą a odbiorcą energii napięcie różni się od znamionowego, to wartość ta jest deklarowanym napięciem zasilania.

Przyjmuje się najczęściej, że czas trwania zaburzenia wynosi od 10 ms do 1 min. Zmniejszenie napięcia do wartości większej niż 90% wartości deklarowanej nie jest traktowane jako zapad napięcia.

Względna amplituda zapadu napięcia $\Delta U_{\%}$ jest definiowana jako różnica między minimalną skuteczną wartością napięcia U podczas zapadu i napięciem deklarowanym:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{DEK} - U}{U_{DEK}} \cdot 100\%$$

W napięciu jednofazowym o okresie T występuje zapad napięcia, jeżeli jego skuteczna wartość wyznaczona w oknie czasowym (będącym całkowitą krotnością $T/2$) jest mniejsza niż 90% wartości deklarowanej. Zapad napięcia zaczyna się na początku pierwszego okna czasowego i kończy na końcu ostatniego okna czasowego, podczas których napięcie jest zawarte w podanym przedziale.

Zapad napięcia w przypadku napięć wielofazowych liczy się już wówczas, gdy występuje przynajmniej w jednym z fazowych lub międzyfazowych napięć. Zaczyna się w chwili, w której pojawi się w pierwszej fazie i kończy po zakończeniu w ostatniej fazie.

Zapad napięcia może mieć kształt prosty jednostopniowy lub złożony, podczas którego napięcie zmienia się w dwóch lub więcej stopniach (rys. 2). W praktycznych rozważaniach – niezależnie od kształtu – jest zazwyczaj traktowany jak pojedyncze zaburzenie. Jako amplitudę zapadu o złożonym kształcie przyjmuje się najczęściej największą zmianę napięcia, a czas trwania jest okresem trwania całego zaburzenia, podczas którego wartość napięcia jest mniejsza niż 90% wartości deklarowanej.

Bardzo często ze względu na układ ponownego załączania podczas eliminacji zwarć (SPZ) zapady napięcia występują w postaci sekwencji kilku następujących po sobie zaburzeń. Skutkiem kilku zapadów występujących blisko siebie może być jedno zakłócenie, np. przerwanie procesu produkcyjnego w wyniku pierwszego zapadu. Stąd w warunkach kontraktu na dostawę energii elektrycznej dyskutuje się procedurę agregacji zdarzeń polegającą na wprowadzeniu minimalnego czasu między dwoma przypadkami, po przekroczeniu którego są one traktowane jako niezależne zaburzenia.

Amplituda, czas trwania i częstość występowania zmian napięcia (również zapadów) zależą od wielu czynników, w tym między innymi od rodzaju sieci (publiczna lub przemysłowa, przesyłowa lub rozdzielcza), jej konfiguracji (radialna, promieniowa, mieszana), poziomu napięcia, procentowego udziału kabli, rodzaju uziemienia, układów zabezpieczeń i praktyki eliminacji zwarć, lokalizacji sieci (wpływ czynników atmosferycznych) itp.

Charakterystyki zaburzenia

Charakterystyki kompatybilnościowe dotyczące rozważanego zaburzenia przedstawiają najczęściej związek amplitudy napięcia podczas zapadu oraz czasu jego występowania (w postaci graficznej lub tabelarycznej).

Wiele lat doświadczeń europejskich zakładów energetycznych pozwoliło w rezultacie sklasyfikować omawiane zaburzenia. Liczba zapadów podczas danego przedziału czasu – dzień, tydzień, miesiąc, rok itp. – jest wpisywana w tablicę odnoszącą się do wyróżnionego punktu zasilania. W tablicy zapady są sortowane i zliczane zgodnie z ich maksymalną amplitudą (w % napięcia U_{DEK} , np. 10-15, 15-30, 30-60, 60-90, 90-100) i czasem

trwania od (20-100 ms, 100-500 ms, od 500 ms do 1 s, 1-3 s, 3-20 s oraz 20-60 s).

Innym, często stosowanym sposobem jest prezentacja zapadów napięcia w postaci punktów o współrzędnych: czas wystąpienia – amplituda zaburzenia na tle charakterystyki CBEMA (*computer business manufacturers association*) pokazanej na rys. 3. Charakterystyka ta definiuje dopuszczalne wartości zapadów i wzrostów napięcia w funkcji czasu ich występowania. Obszar pomiędzy gałęziami charakterystyki jest obszarem akceptowanej (z punktu widzenia sprzętu informatycznego) jakości napięcia zasilającego.

Charakterystyka ta została poddana modyfikacji w 1996 r. i obecnie jest znana jako charakterystyka ITIC (*information technology industry council*, <http://www.itic.org>). Dotyczy ona zaburzeń o czasie trwania od 1 μ s do stanu ustalonego i amplitudach zawartych w przedziale 0-500% napięcia znamionowego. Jak wynika z charakterystyki, czas trwania jednej z najbardziej podstawowych przyczyn zapadów – jednofazowego zwarcia – nie może być dłuższy niż kilkanaście milisekund, aby punkt reprezentujący to zaburzenie był zawarty w dopuszczalnych granicach. Ze względu na ograniczenie negatywnych skutków tego zaburzenia, czas zadziałania systemów zabezpieczeń zwarciovych jest więc bardzo ważny.

Przyczyny zaburzenia

Za główne przyczyny zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu należy uznać:

- zwarcia systemowe lub zwarcia w samych instalacjach,
- procesy łączenia odbiorników dużej mocy,
- zmiany konfiguracji sieci,

– pracę odbiorników o zmiennym obciążeniu (szczególnie biernym).

● **Zwarcia systemowe lub zwarcia w instalacjach odbiorcy.** Zwarcia mogą być jednofazowe (najczęściej) lub dwu- i trójfazowe. Mogą występować zarówno w sieciach przesyłowych, jak i rozdzielczych, a także w instalacjach odbiorców. Powodują przebiegi prądowe, skutkiem których są spadki napięć na impedancjach systemu i w konsekwencji zapady napięcia.

Większość zwarć w systemie jest eliminowana dzięki działaniu zabezpieczeń. W typowych rozwiązaniach wyłączniki w rozdzielniach powodują wyłączenie uszkodzonych linii i umożliwiają samoczynną eliminację zwarcia. Czas zadziałania zabezpieczenia (czas trwania zwarcia i zarazem czas zapadu lub przerwy w zasilaniu) zależy między innymi od lokalizacji odbiorcy względem miejsca zwarcia oraz praktyki eliminacji zwarć.

Systemy zabezpieczeń są projektowane w taki sposób, aby ograniczyć liczbę odbiorców, którzy doświadczają skutków tego zaburzenia. Dla odbiorców poniżej miejsca zwarcia skutkiem jest krótka lub długa przerwa w zasilaniu. Dla odbiorców przyłączonych powyżej miejsca zwarcia lub do równoległych linii jest to zapad napięcia o amplitudzie zależnej od „elektrycznej” odległości od miejsca zwarcia. Na rys. 4 przedstawiono typowy system rozdzielczy z pewną liczbą linii zasilanych ze wspólnych szyn. Zwarcie w linii 1 spowoduje przerwę zasilania, którą doświadczą odbiorcy tej linii. W trzech pozostałych liniach wystąpi zapad napięcia. Odłączenie równoległej linii nie zawsze oznacza, że jej napięcie zmniejszy się natychmiast do zera. Staje się to często stopniowo ze względu na obecność maszyn wirujących. Przez krótki okres maszyny te pracują jako generatory przekazujące energię do linii zasilającej.

01/00475-01



Twelve electric
 Kompensacja Mocy Biernej
 Rozdział Energii
 Monitoring Jakości Sieci
 Osprzęt Elektrotechniczny

Po rozszerzoną wersję artykułu prof. Z. Hanzelki dzwoni:
(22) 872-20-20
 lub odwiedź stronę www.twelve.com.pl

AS-3
 ANALIZATOR PARAMETRÓW SIECI

REGULATOR MOCY BIERNEJ MAX 12 CS

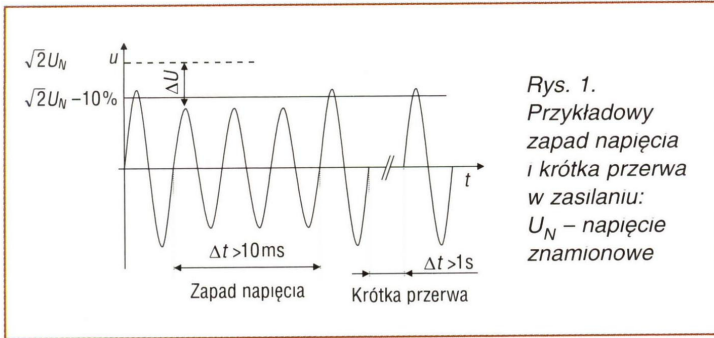
JEEN 2000
 im K Szpotańskiego
INSTALEKTRA
 Bydgoszcz 2000

ZŁOTA ISKRA
ELEKTROEXPO
 Warszawa 2000

ZŁOTY MEDAL
INSTALEKTRA
 Bydgoszcz 2000

MEDAL PREZESA SEP
ELEKTROINSTALACJEA
 Gdańsk 2000

TVELVE ELECTRIC 04-994 Warszawa, ul. Poezji 19
 tel. (22) 872 20 20, fax (22) 612 79 49
www.twelveE.com.pl



Rys. 1. Przykładowy zapad napięcia i krótka przerwa w zasilaniu: U_N – napięcie znamionowe

W przypadku automatyki ponownego załączania odbiorcy równoległych linii mogą doświadczyć kilku zapadów napięcia trwających od pojedynczych do kilkunastu okresów w zależności od stosowanych rozwiązań eliminacji zwarć.

● **Załączanie odbiorników dużej mocy.** Dotyczy to w szczególności rozruchu silników elektrycznych. Napięcie w linii zasilającej, w której odbywa się taki rozruch, zmniejsza się na skutek dużej wartości prądu łączeniowego (głównie o charakterze biernym) i w konsekwencji spadku napięcia na impedancji systemu. Amplituda zapadu nie jest stała podczas rozruchu i zależy od zmieniającej się wartości prądu rozruchu. Prąd ten jest największy w początkowym okresie, po czym zanika wraz ze wzrostem prędkości silnika. Związany z nim spadek napięcia na impedancji sieci zasilającej jest więc największy na początku rozruchu silnika, a następnie jego wartość ulega zmniejszeniu (rys. 5). W tym przypadku zapad napięcia ma przewidywalny charakter. Względnie łatwe jest więc zaprojektowanie układu napędowego i układu zasilania w taki sposób, aby rozruch napędu nie powodował znaczących zaburzeń. Jest to problem o charakterze głównie lokalnym i z reguły nie wpływa na pracę zbyt dużej liczby innych odbiorników. Stosowane są różne sposoby złagodzenia rozruchu, tj. rozrusznik gwiazda-trójkąt, rozruch rezystancyjny i reaktancyjny, rozruch autotransformatorowy, szeregowe lub równoległe łączenie uzwojeń w silnikach z dzielonymi uzwojeniami, układy *soft-start* itp.

Silniki mogą być również źródłem zapadów napięcia (niekiedy wielokrotnych) powodowanych zmiennym w czasie obciążeniem mechanicznym.

Skutki zaburzenia

Są zależne od wielu czynników, z których jako najbardziej istotne należy wymienić amplitudę i czas trwania zjawiska. Odbiornik może zostać odłączony przez układy zabezpieczające lub jego praca może być niewłaściwa, jeżeli napięcie osiągnie zbyt małą wartość lub zapad będzie trwał zbyt długo. Skutki mogą być bardzo znaczące zarówno z technicznego, jak i ekonomicznego punktu widzenia.

Spośród wielu odbiorników czułych na zapady napięcia należy wymienić w szczególności napędy elektryczne zarówno o stałej jak i regulowanej prędkości. W strukturze tych ostatnich można wyróżnić trzy podstawowe elementy składowe o różnym stopniu odporności na zaburzenie:

- aparaturę łączeniową,
- układ energoelektroniczny,
- układ pomiarowo-sterujący.

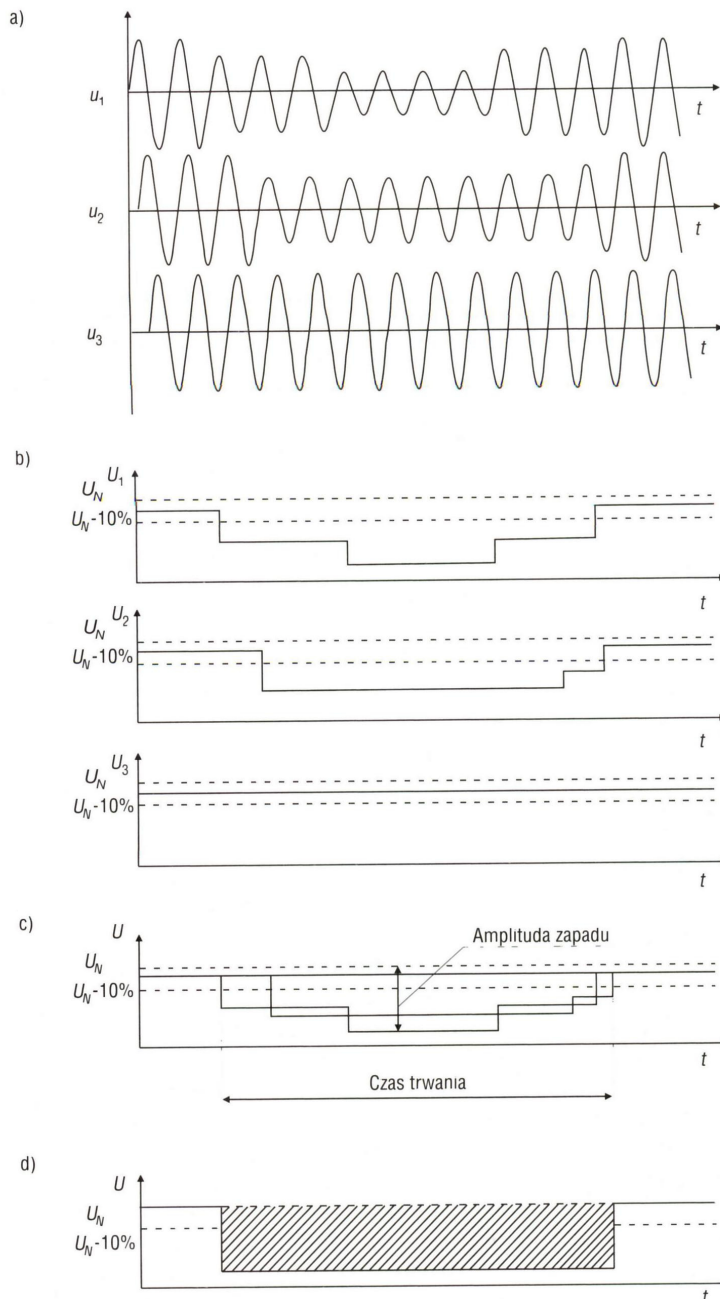
Odporność aparatury łączeniowej

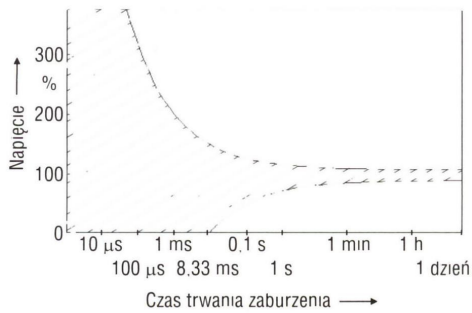
Analizując skutki zaburzenia w przypadku aparatury łączeniowej niezależnie od aplikacji – występuje zawsze problem, gdy stycznik lub przełącznik rozłączy się w sposób niezamierzony podczas zaburzenia elektromagnetycznego. Prowadzi to zwykle do niekontrolowanego przerywania procesu. Wielu wytwórców podaje, że ich styczniki odpadają przy 50% napięcia znamionowego U_N , jeżeli te warunki trwają dłużej niż jeden okres [1]. Te

dane zmieniają się w zależności od producenta, lecz w praktyce nieprawidłowość działania styczników występuje często już przy 70% U_N lub więcej.

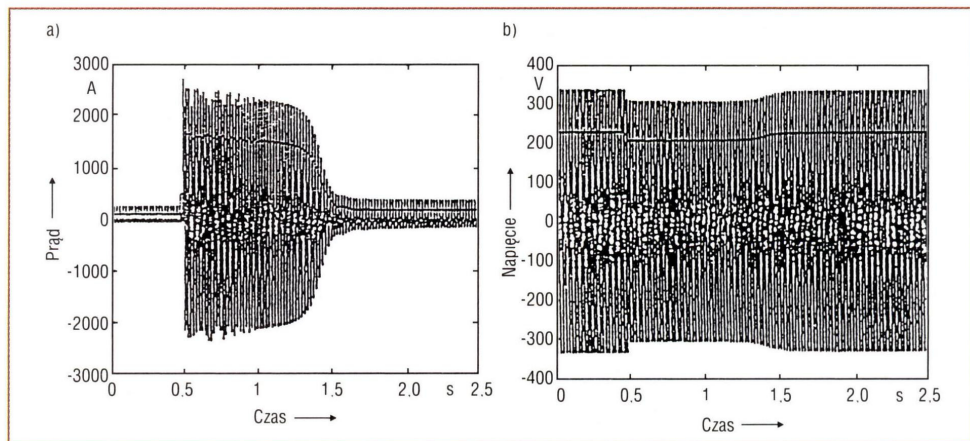
W stycznikach zjawisko histerezy i zmiany obwodu magnetycznego związane z ruchem zwory sprawiają, że ich zachowanie się podczas zapadu napięcia jest w pewnym stopniu procesem losowym. Siła utrzymująca przesuwającą zworę w odpowiedniej pozycji jest proporcjonalna do kwadratu prądu w cewce i osiąga wartość zero dwukrotnie podczas okresu napięcia. Konstrukcja mechaniczna stycznika oraz inercja jego części ruchomych powodują, że pracuje on prawidłowo również w tych zakresach wartości prądu, w których siła przyciągania maleje poniżej minimalnej wartości podtrzymania. Tak więc podczas normalnej pracy styki stycznika pozostają w pożądanym stanie. Pojawienie się nieprawidłowości w jego działaniu wymaga jednoczesnego wystąpienia kilku niekorzystnych czynników. Do tych czynników należy, oprócz amplitudy zapadu oraz czasu jego trwania, także punkt przebiegu czasowego napięcia, w którym rozpoczyna się zapad (faza początkowa zaburzenia),

Rys. 2. Trójfazowy wielostopniowy zapad napięcia: a) przebiegi czasowe napięć fazowych, b) przebiegi wartości skutecznych napięć fazowych, c) czas trwania i amplituda zapadu trójfazowego, d) trójfazowy zastępczy zapad napięcia

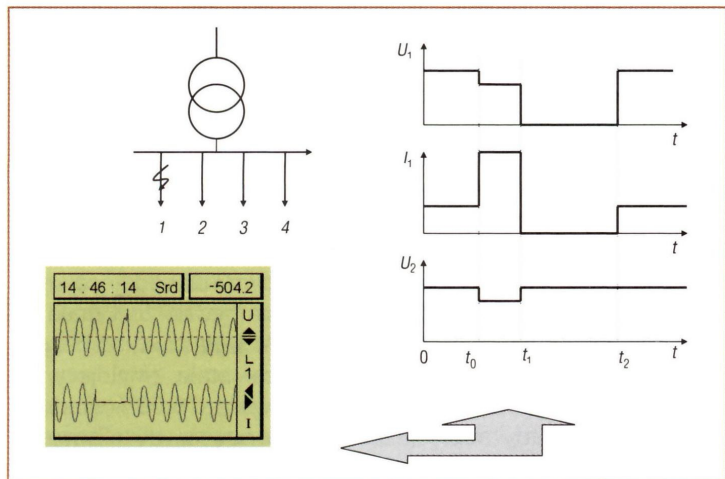




Rys. 3. Prezentacja zapadów napięcia na tle krzywej czułości CBEMA



Rys. 5. Przykładowy zapad napięcia (b) spowodowany prądem rozruchowym (a) przy bezpośrednim rozruchu silnika prądu przemiennego



Rys. 4. Procedura działania układu zabezpieczeń: (t_0 – chwila pojawienia się zwarcia, (t_1-t_0) – detekcja zwarcia i czas zadziałania zabezpieczenia, (t_2-t_1) – czas wyłączenia zwartej linii, t_2 – czas ponownego załączenia, zwarcie jest wyeliminowane (kształt przebiegu czasowego zapadu napięcia oraz występujący prąd zarejestrowano miernikiem AS-3 produkcji firmy TWELVE umożliwiającym gromadzenie w rejestrze zdarzeń ostatnich 40000 przekroczeń zadanych przez operatora, granicznych wartości skutecznych napięcia i amplitudy zaburzenia oraz daty i czasu jego wystąpienia)

oraz punkt, w którym napięcie wraca do pierwotnej wartości (faza końcowa zaburzenia). Podczas zapadu występuje składowa stała prądu mająca zasadniczy wpływ na zachowanie się stycznika. Nawet niewielka wartość tej składowej w napięciu wywołuje przepływ znaczącego prądu stałego, co może spowodować podtrzymanie stycznika przy prądzie o mniejszej wartości skutecznej niż w przypadku prądu przemiennego bez składowej stałej. Dodatkowo składowa prądu stałego pozwala uniknąć strat związanych z histerezą obwodu magnetycznego i dzięki temu uzyskać większą średnią wartość strumienia.

Najczęściej stycznik dużej mocy ma wystarczająco dużo energii zmagazynowanej w cewce, aby zapobiec przedwczesnym wyłączeniom. Zastosowanie pośrednich przekaźników w obwodach zasilających napędy do załączania styczników głównych zasadniczo zmniejsza odporność instalacji jako całości. Przekazniki są z reguły bardziej czułe na zaburzenie, zmagazynowana w nich bowiem energia jest mniejsza oraz mniejsza jest inercja ich ruchomych części.

Dążenie do redukcji wymiarów aparatury łączeniowej prowadzi często w konsekwencji do urządzeń o mniejszej energii gromadzonej, a więc mniej odpornych na zapady napięcia.

W układach rozruchowych silników SN są zwykle stosowane cewki prądu stałego zasilane z sieci prądu przemiennego przez prostowniki. Ich odporność na zapady jest większa niż styczników prądu przemiennego.

Odporność regulowanych napędów

Stanowią one jeden z największych problemów podczas zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu. Są szczególnie czułe na ten rodzaj zaburzenia, a ich znaczne moce jednostkowe czynią wszelkie sposoby redukcji skutków zaburzenia zagadnieniem trudnym technicznie i najczęściej bardzo kosztownym. Negatywny efekt jest natychmiastowy, nie tak jak w przypadku innych rodzajów zaburzeń (harmoniczne, asymetria itp.).

W przypadku regulowanych napędów charakteryzowanie zapadu napięcia tylko w układzie współrzędnych amplituda-czas trwania zaburzenia jest 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 występującą także podczas zapadu zmianę ich kątów fazowych. Dodatkowo ta uproszczona charakterystyka nie uwzględnia także niesinusoidalności przebiegu napięcia podczas zapadu.

Napędy prądu stałego i przemiennego, będące najbardziej powszechnymi układami energoelektronicznymi, reagują różnie na zapady napięcia, różnią się bowiem topologią części energoelektronicznej i układami sterowania (zarówno *softwarem*, jak i *hardwarem*).

Są trzy główne przyczyny, które sprawiają, że napędy są czułe na rozważany rodzaj zaburzeń.

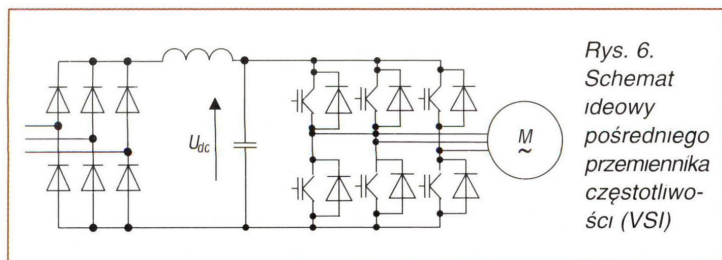
Pierwsza to zasilanie układu sterowania napędu. Gdy jego zasilacze nie mogą zapewnić wystarczającego poziomu napięcia, wówczas napęd musi być wyłączony ze względu na groźbę utraty kontroli nad jego pracą. Tak więc pierwsze działania naprawcze idą w kierunku podtrzymania zasilania układu pomiarowo-sterującego.

Drużga grupa dotyczy możliwych nieprawidłowości w pracy lub nawet groźby wystąpienia stanu awaryjnego w części „siłowej” (energoelektronicznej) układu w następstwie zaburzenia.

Trzecią przyczyną jest to, że wiele procesów ze względów technologicznych nie toleruje utraty precyzyjnej kontroli prędkości lub momentu nawet przez kilka sekund.

Reakcja napędu na zapady napięcia jest także funkcją rodzaju obciążenia oraz parametrów napędu. Pewne procesy mogą tolerować znaczące zmniejszenie prędkości i momentu silnika, inne zaś takich zmian nie dopuszczają. Wiele z nich wymaga precyzyjnej i dokładnej kontroli takich wskaźników jak np. ciśnienie, temperatura, przepływ. W większości tych procesów korzysta się z napędu silników elektrycznych, a moment i prędkość silnika bezpośrednio wpływa na zmienne procesu.

Odporność na zapady napięcia typowego regulowanego napędu prądu przemiennego z pośrednim przemiennikiem częstotliwości VSI (*voltage source inverter* – rys. 6) i diodowym mostkiem wejściowym jest na ogół znaczna, ponieważ kondensator



Rys. 6.
Schemat
ideowy
pośredniego
przemiennika
częstotliwości (VSI)

i zgromadzona w nim energia jest zdolna do czasowej kompensacji zmiany napięcia zasilającego (przy założeniu krótkiego czasu trwania i małej amplitudy zaburzenia).

Gdy napięcie wejściowe jest symetryczne, diody w mostku wejściowym podejmują przewodzenie w sposób regularny, a prądy wejściowe mają symetryczne przebiegi.

W przypadku gdy napięcia fazowe są niesymetryczne, np. podczas jednofazowego zwarcia, przewodzenie diod mostka wejściowego nie jest regularne. W rzeczywistych warunkach maksymalne napięcia jednej lub więcej faz są redukowane do wartości mniejszej niż znamionowe napięcie kondensatora i dlatego nie ma transmisji energii elektrycznej z sieci zasilającej do kondensatora. Ten ostatni rozładowuje się do chwili, w której kolejny szczyt napięcia stworzy warunki do jego doładowania. Kondensator rozładowuje się wówczas w stopniu większym niż normalnie, co powoduje, że prąd płynący z sieci w celu jego doładowania będzie duży (w pewnych przypadkach jego wartość skuteczna w jednej fazie może przekroczyć nawet 200% prądu znamionowego, a wartość szczytowa krotność 4 [2]). Występują przedziały czasu, w których trójfazowy mostek pracuje jak urządzenie jednofazowe podłączone między dwie linie zasilające o największej wartości napięcia międzyfazowego. Prądy zawiera-

ją trzecią harmoniczną o znaczącej wartości, która jest składową nie charakterystyczną dla tej konfiguracji.

Przetężenie prądowe może uaktywnić zabezpieczenia nadprądowe i w konsekwencji może wystąpić zatrzymanie napędu. Może też nastąpić przepalenie wkładki topikowej bezpieczników, szczególnie w przypadku wyposażenia falownika w szybkie bezpieczniki wejściowe (zwykle wymagane przez producenta układu) przy małym marginesie koordynacji zabezpieczeń. Często nawet niewielka niesymetria napięć zasilających może być przyczyną zadziałania bezpieczników nawet wówczas, gdy to zaburzenie nie jest wystarczająco duże, aby spowodować znaczącą redukcję napięcia w obwodzie pośredniczącym przemiennika. Właściwa koordynacja bezpieczników oraz stosowanie dławików sieciowych na ogół pozwala w praktyce skutecznie wyeliminować tę eksploatacyjną niedogodność.

W przypadku zapadu, podczas którego nie jest dostępna energia elektryczna z systemu zasilającego (np. zwarcie trójfazowe), energia zgromadzona w obwodzie pośredniczącym prądu stałego (w kondensatorze) jest absorbowana przez silnik w kilku okresach i napięcie stałe kondensatora U_{DC} maleje do zera w typowym czasie kilkudziesięciu milisekund. Prędkość silnika zmniejsza się z pochodną zależną od momentu bezwładności i momentu obciążenia mechanicznego zredukowanych na wał silnika.

Większość napędów ma wewnętrzne zabezpieczenia kontrolujące napięcie w obwodzie pośredniczącym i powodujące wyłączenie napędu, gdy wartość tego napięcia będzie zbyt mała. W tych warunkach układ zostanie awaryjnie wyłączony zabezpieczeniem podnapięciowym, jeżeli napięcie stałe zmniejszy się poniżej przyjętej wartości progowej (zwykle 75-90% wartości znamionowej). Gdy napięcie powróci ponownie do pierwotnej początkowej wartości, silnik nie może być natychmiast zasilony

przez przekształtnik ze względu na groźbę wystąpienia przetężenia o dużej wartości, stwarzającego niebezpieczeństwo przepalenia bezpieczników i/lub uszkodzenia elementów półprzewodnikowych, lub ze względu na możliwość wystąpienia zmiany momentu niekorzystnej dla napędzanego silnikiem agregatu.

W dużej liczbie napędów, szczególnie starszej generacji, układy sterowania i zabezpieczeń są zasilane z sieci prądu przemiennego, co sprawia, że są one szczególnie czułe na występujące tam zaburzenia. Systemy sterowania większości obecnie stosowanych napędów kontrolują napięcie stałe. W ich przypadku układy sterowania i zabezpieczeń są bezpośrednio zasilane z tego napięcia. Gwarantuje to kontrolę pracy napędu do chwili jego całkowitego wyłączenia dzięki dużej energii zgromadzonej w kondensatorze. Napięcia zasilające prądu przemiennego są wówczas często poza kontrolą, lecz układy są mniej czułe na zaburzenia.

Odporność sprzętu informatycznego

W każdym zastosowaniu jest on bardzo czuły (zarówno *hardware* jak i *software*) na zmiany napięcia, jeżeli ich amplituda przekracza $10\% U_N$. Najpowszechniej występującymi skutkami zaburzenia są brak transmisji sygnałów lub błędy w ich przekazie (możliwym, sygnalizowanym w literaturze skutkiem jest także utrata synchronizacji napędów dysków). Większość sprzętu informatycznego ma wbudowane detektory zaburzeń zasilania 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 (obniżanie) niż na nagłą przerwę zasilania. Niektóre detektory uszkodzeń nie reagują bowiem dostatecznie szybko na stopniową redukcję wartości napięcia zasilającego. Wówczas stałe napięcie zasilające układy scalone może zmniejszyć się do poziomu niższego niż minimalne napięcie pracy, zanim detektor uszkodzenia zostanie pobudzony. W efekcie dane mogą być utracone lub sfalszowane. Po powrocie napięcia sprzęt taki może nie być zdolny do poprawnego ponownego uruchomienia i może wymagać przeprogramowania. Z tego powodu podano w normach szczegółowe procedury testowania odporności sprzętu informatycznego na omawiany rodzaj zaburzenia.

Sterowanie realizowane przez programowalne sterowniki logiczne PLC (*programmable logic controller*) można opisać w czterech podstawowych krokach 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 wyróżnionych procedur. Zakłócenie występujące w każdym z modułów może przerwać ciągłość całego procesu technologicznego. Czas pojedynczego cyklu pracy PLC często nie przekracza 20 ms, a więc jest współmierny z czasem występowania zaburzeń.

Jednym ze „słabszych miejsc” w PLC jest jego układ zasilający. Jest to typowy układ elektroniczny zasilany napięciem przemiennym, które przekształca (najczęściej impulsowo) na napięcie stałe zasilające pozostałe elementy PLC. Odporność zasilacza zależy przede wszystkim od wymaganego stopnia stabilizacji napięcia stałego oraz energii zgromadzonej w kondensatorze zasilacza. Niekiedy urządzenia I/O są lokalizowane w pobliżu urządzeń peryferyjnych 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-a, natomiast nie zawsze dotyczy to koncentratorów.

Wejściowe urządzenia peryferyjne, tj. przyciski, czujniki itp., są galwanicznie połączone ze sterownikiem. Powszechny jest dyskretny charakter wejść. Napięcia progowe, przy których jest ustalona wartość sygnału logicznego – 0 lub 1 – nie są standaryzowane. Np. jeżeli zapad napięcia spowoduje w czasie kilku okresów obniżenie wartości sygnału wejściowego, może wynikać 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 zadziałanie analogiczne do skutków jego zamierzonego uaktywnienia.

Przeciwdziałanie skutkom zapadów napięcia

Na rynku jest obecnie dostępna bardzo duża liczba napędów, przy czym nawet różne modele tego samego rodzaju napędu mają inną odporność na zapady napięcia. Wiele eksploatowanych regulowanych napędów ulega awaryjnemu wyłączeniu nawet wówczas, gdy napięcie obniży się niewiele poniżej 90% w czasie dłuższym niż dwa okresy napięcia [3]. Istnieje generalny pogląd, wyrażony w licznych publikacjach, że przy zapadach napięcia o amplitudzie większej niż 20% i czasie trwania dłuższym niż 10 okresów następuje awaryjne wyłączenie większości napędów. Duża liczba zapadów napięcia przekracza te wartości. Amplitudy tych zaburzeń często osiągają poziom 50%, dlatego skonstruowanie napędu zdolnego do pracy przy zapadach o takich wartościach jest zadaniem o ogromnym znaczeniu. Producent powinien dostarczyć nabywcy napęd działający poprawnie w zdefiniowanych przez niego warunkach zasilania i niezbyt drogi. Pożądane jest takie rozwiązanie problemu, które nie wprowadzi zbyt daleko idących zmian w istniejących konstrukcjach. Miarą najbardziej pożądanej odporności napędu byłaby jego zdolność do pracy podczas zapadu o amplitudzie 50% i czasie trwania zawartym w przedziale 0,5-5 s, przy zachowaniu stałej wartości prędkości i momentu [4].

Zaproponowano wiele różnych sposobów technicznych, które mają zabezpieczyć realizowaną technologię przed skutkami awaryjnych wyłączeń napędów. Można wyróżnić wśród nich cztery kategorie:

– zmiana sposobu eksploatacji napędu i modyfikacja jego sterowania (ręczny lub automatyczny – z opóźnieniem lub bez – ponowny rozruch, hamowanie napędu, synchronizacja inwertora z napięciem na zaciskach silnika, zagwarantowanie pewnego zasilania dla układu sterowania, pętla fazowa w obwodach synchronizacji, wykorzystanie energii kinetycznej napędu i napędzanego agregatu, redukcja momentu obciążenia itp.);

– modyfikacja topologii układów energoelektronicznych (wzrost mocy baterii kondensatorów w obwodzie pośredniczą-

cym falownika, wspólny obwód napięcia stałego w napędach wielosilnikowych, dodatkowe przekształtniki dc/dc w obwodach pośredniczących falowników napięcia, aktywny przekształtnik wejściowy falownika z opcją stabilizacji napięcia na kondensatorze w obwodzie pośredniczącym itp.);

- alternatywne zasilanie;
- instalowanie kompensującego sprzętu.

Wnioski

Powszechność występowania zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu – szczególnie na poziomie niskiego napięcia (lecz nie tylko) – sprawia, że zagadnienie odporności odbiorników energii elektrycznej, a zwłaszcza napędów elektrycznych i innych układów energoelektronicznych staje się jednym z problemów o kapitalnym znaczeniu zarówno technicznym, jak i ekonomicznym. Konsekwencją ustalenia odporności odbiornika na zakłócenia w jego zasilaniu jest rozwój metod i sposobów poprawy tej odporności zarówno w urządzeniach zewnętrznych napędu, jak i zmiany jego konstrukcji oraz zasad sterowania. Wydaje się, że w większości oferowanych obecnie na rynku napędów nie stosuje się szczególnych strategii sterowania w razie wystąpienia zaburzenia. Wyjątkiem jest zatrzymanie napędu w przypadku, gdy zapad napięcia przekroczy zadaną wartość graniczną. W tym celu jest realizowana kontrola napięcia prądu stałego i napęd jest wyłączany niezależnie od tego jaki rodzaj zaburzenia wystąpił (zapad czy przerwa w zasilaniu). Ten stan powinien ulec zmianie. Użytkownik powinien uzyskać możliwość zakupu napędu o poziomie odporności właściwym dla środowiska elektromagnetycznego, w którym napęd ma być zainstalowany.

Dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka

**– profesor Akademii Górniczo-Hutniczej,
konsultant ds. technicznych firmy TWELVE**

204

Ei

LITERATURA

1. McGRANAGHAN M. F. Effects of voltage sags in proces industry applications. Stockholm Power Tech. Conf., Stocholm, Sweden, June 18-22, 1995.
2. MANSOOR A., COLLINS E. R., MORGAN R. L.: Effects of unsymmetrical voltage sags on adjustable speed drives. Proceedings of the ICHQP 7th Intrnationale Conf. on Harmonics and Quality of Power. October 16-18, 1996 Las Vegas, Nevada, USA.
3. Van ZYL A., SPEE R., FAVELUKE A., BHOWMIK S.: Voltage sag ride-through for adjustable-speed drives with active rectifiers. IEEE Tran. on Ind. Appl. 1998, 34, 6, 1270-1277.
4. Von JOUANNE A., ENJETI P. N., BANERJEE B.: Assessment of ride-through alternatives for adjustable-speed drives. IEEE Trans. on Ind. Applications, 4, 35, 1999, 908-916.