

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

CZĘŚĆ 2 - Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu – wpływ na pracę napędów elektrycznych o regulowanej prędkości

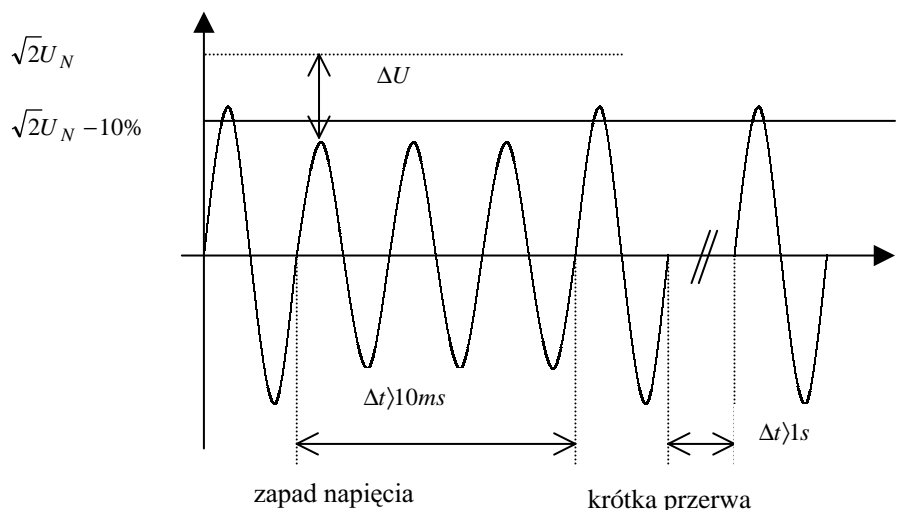
Zbigniew Hanzelka

Akademia Górniczo-Hutnicza, 30-019 Kraków, Al. Mickiewicza 30
tel: (012) 617 28 78, tel/fax: (012) 633 22 84, e-mail: hanzel@uci.agh.edu.pl
Konsultant techniczny Twelve Electric.

Streszczenie: Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu są obecnie jednym z najważniejszych zagadnień w dziedzinie jakości energii elektrycznej. Stanowi to uzasadnienie podjętych w ostatnich kilku latach intensywnych prac zmierzających do rozpoznania i formalnego opisu tych zjawisk, określenia odporności najpowszechniej stosowanego sprzętu elektrotechnicznego i elektronicznego oraz zaproponowania środków technicznych minimalizujących skutki ich występowania. W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące tych zaburzeń, ich ilościowego opisu oraz przyczyn występowania. Omówiono także skutki ich obecności 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.

1. WSTĘP

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



Rys. 1 Przykładowy zapad napięcia i krótka przerwa w zasilaniu; U_N - napięcie znamionowe

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przebieg zapadu napięcia i krótką przerwę w zasilaniu wraz z wielkościami które charakteryzują 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 jako zapad napięcia jego nagłe zmniejszenie do wartości zawartej pomiędzy 90% i 10% deklarowanego napięcia¹ U_{DEK} , po którym, po krótkim okresie czasu, następuje powrót do wartości deklarowanej.

Przyjmuje się, 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 (ΔU %) jest definiowana jako różnica pomiędzy minimalną skuteczną wartością napięcia podczas zapadu (U) i napięciem deklarowanym²:

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

W czasie trwającej dyskusji nad unifikacją definicji wysunięto szereg innych propozycji które zawierają także sugestie dotyczące sposobu pomiaru podstawowych parametrów charakteryzujących zaburzenie w sposób ilościowy. Najbardziej reprezentatywna jest propozycja francuska, wg której w napięciu jednofazowym o okresie T , występuje załamanie napięcia jeżeli jego skuteczna wartość wyznaczona w oknie czasowym (będącym całkowitą krotnością $T/2$) jest mniejsza niż 90% wartości deklarowanej³. Zapad napięcia zaczyna się na początku pierwszego okna czasowego i kończy na końcu ostatniego okna czasowego podczas których napięcie zawarte jest w podanym przedziale.

Dla napięć wielofazowych występuje zapad napięcia jeżeli występuje on przynajmniej w jednym z fazowych lub międzyfazowych napięć. Zaczyna się w chwili w której pojawi się w pierwszej fazie i kończy z końcem zapadu w ostatniej fazie (rys. 2).

Krótką przerwę oznacza napięcie o wartości mniejszej od minimalnej definiującej zapad. Dla celów pomiarowych przyjmuje się najczęściej jako dolną granicę 10% napięcia deklarowanego⁴.

¹ Napięcie deklarowane to zwykle napięcie znamionowe systemu. Jeżeli w efekcie porozumienia pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii napięcie różni się od znamionowego, wówczas jest ono deklarowanym napięciem zasilania. W sieciach WN jako napięcie deklarowane przyjmuje się wartość skuteczną napięcia wyznaczoną w okresie poprzedzającym załamanie.

² W języku angielskim występują dwa określenia zapadu napięcia: *supply voltage dip* – preferowane przez IEC oraz *voltage sag* stosowane głównie w literaturze amerykańskiej (np. Std. IEEE 1159). Różnice nie dotyczą tylko terminu. Różne są także definicje tych pojęć. I tak:

- *voltage dip* ma wartość określoną ilorazem redukcji napięcia do jego wartości przed wystąpieniem zaburzenia U^* tzn.:

$$\text{voltage dip magnitude} = \frac{\Delta U}{U^*} 100\%$$

Np. 20%-wy zapad napięcia wg tej definicji oznacza taką wartość napięcia podczas zapadu, która jest o 20% mniejsza od jego wartości początkowej przed wystąpieniem zaburzenia.

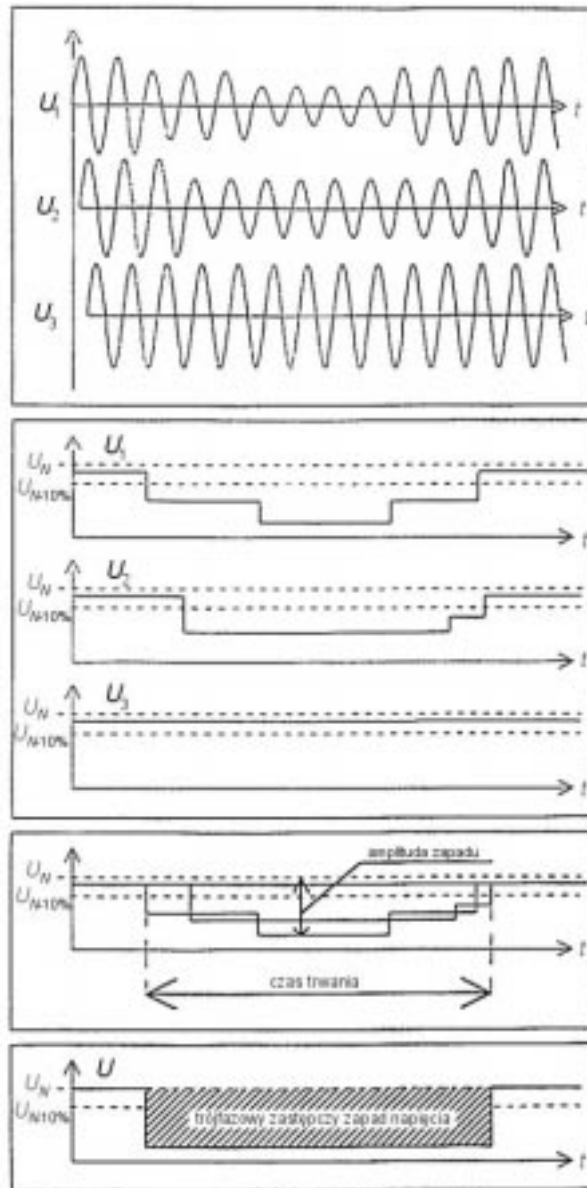
- *Voltage sag* jest chwilową redukcją napięcia zasilającego którego wartość podczas zaburzenia wynosi: 0-90% napięcia początkowego. Przeciwnie niż w przypadku *voltage dip*, wartość *voltage sag amplitude* jest względną wartością aktualnie występującego napięcia odniesioną do napięcia początkowego przed wystąpieniem zaburzenia.

$$\text{voltage sag magnitude} = \frac{U}{U^*} 100\%$$

Przykładowo, 80%-wy zapad napięcia wg tej definicji oznacza chwilowe zmniejszenie wartości napięcia do poziomu 80% wartości początkowej.

³ Zastąpienie wartości deklarowanej inną uzgodnioną pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii czyni tę definicję odpowiednią dla celów kontraktowych.

⁴ Definicje tych zaburzeń stosowane w wielu narodowych i międzynarodowych dokumentach różnią się wartościami liczbowymi amplitudy i czasu trwania zaburzenia (np. IEC 61000-4-11, EN50160, IEEE1159, CEA, CENELEC, EPRI, EMERALD CONTRACT itd.)



Rys. 2 Trójfazowy wielostopniowy zapad napięcia

Zapad napięcia może mieć prosty jednostopniowy kształt lub złożony, podczas którego napięcie zmienia się w dwóch lub więcej stopniach (rys. 2). W praktycznych rozważaniach niezależnie od kształtu jest ono traktowane zazwyczaj jako pojedyncze zaburzenie. Jako amplituda zapadu o złożonym kształcie jest przyjmowana najczęściej największa zmiana napięcia, a czas trwania jest czasem trwania całego zaburzenia podczas którego wartość napięcia jest mniejsza niż 90% wartości deklarowanej.

Bardzo często, ze względu na system 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 pierwszym zapadem. Stąd w warunkach kontraktu na dostawę energii dyskutuje się procedurę agregacji zdarzeń polegającą na wprowadzeniu minimalnego czasu pomiędzy dwoma przypadkami po przekroczeniu którego są one traktowane jako niezależne zaburzenia.

Amplituda, czas trwania i częstość występowania zmian napięcia (również zapadów) zależy od wielu czynników, w tym między innymi od rodzaju sieci (publiczna lub przemysłowa, transmisyjna 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.

2. 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 zaowocowało formą klasyfikacji omawianych zaburzeń przedstawioną w tablicach 1 i 2. Liczba zapadów podczas danego przedziału czasu – dzień, tydzień, miesiąc, rok itp. – jest wpisywana w tablicę odnoszącą się do wyróżnionego punktu zasilania. Postać tablic może być różna w zależności od postanowień kontraktu. Poniżej przedstawiono dwie przykładowe⁵.

- w g U N I P E D E zapady są sortowane i zliczane zgodnie z ich maksymalną amplitudą i czasem trwania – tablica 1.

Tablica 1

Czas trwania	od 20ms do 100ms	od 100ms do 500ms	od 500ms do 1s	od 1s do 3s	od 3s do 20s	od 20s do 60s
Amplituda (%) U_{DEK}						
Od 10 do 15						
Od 15 do 30						
Od 30 do 60						
Od 60 do 90						
Od 90 do 100						
100						

- alternatywnym sposobem jest klasyfikacja wg „czasu występowania zaburzenia poniżej danego progu napięciowego” – tablica 2. Tablica ta, podobna do zalecanej przez UNIPED E, zawiera w poszczególnych kratkach liczbę zapadów których amplituda ma wartość większą niż określona dla danego wiersza.

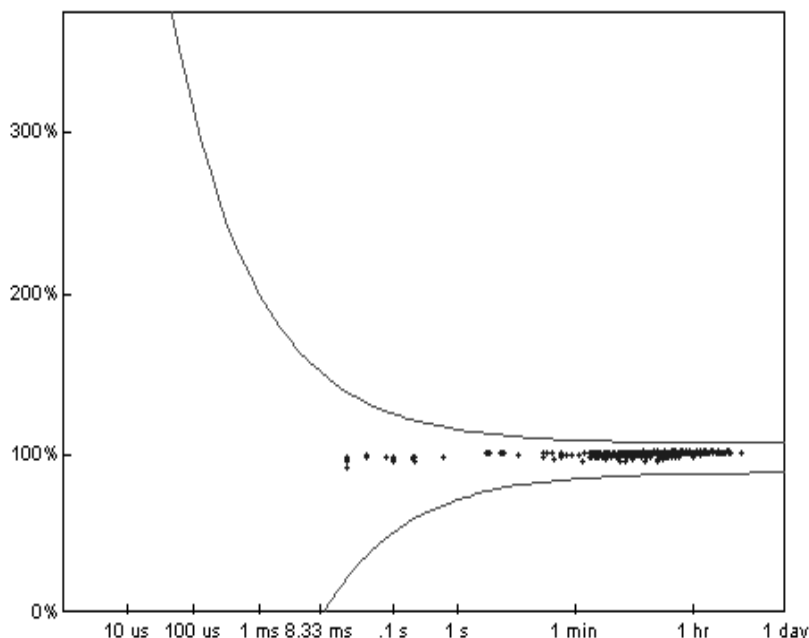
Tablica 2

Czas trwania	od 20ms do 100ms	od 100ms do 500ms	od 500ms do 1s	od 1s do 3s	od 3s do 20s	od 20s do 60s
Amplituda (%) U_{DEK}						
≥ 10						
≥ 15						
≥ 30						
≥ 60						
≥ 90						

Innym, często stosowanym sposobem jest prezentacja zapadów napięcia w postaci punktów o współrzędnych: czas wystąpienia zaburzenia-amplituda na tle charakterystyki CBEMA (*Computer Business Manufacturers Association*) – rysunek 3. Charakterystyka ta definiuje dopuszczalne wartości zapadów i wzrostów napięcia w funkcji czasu ich występowania. Obszar

⁵ Dla tej formy tabulacji prostokątny zapad napięcia pojawia się w pojedynczych kolumnach i w kilku wierszach w zależności od maksymalnej amplitudy, podczas gdy złożony zapad może pojawić w więcej niż jednej kolumnie.

pomiędzy gałęziami charakterystyki jest obszarem akceptowanej (z punktu widzenia sprzętu informatycznego) jakości napięcia zasilającego.



Rys. 3 Prezentacja załamania napięcia na tle krzywej czułości CBEMA

Charakterystyka ta została poddana modyfikacji w 1996 roku i obecnie jest znana jako charakterystyka ITIC (*Information Technology Industry Council*)⁶. Odnosi się do zaburzeń o czasie trwania od 1 μ s do stanu ustalonego, o amplitudach zawartych w przedziale 0-500% napięcia znamionowego. Jak widać na charakterystyce czas trwania jednej z najbardziej podstawowych przyczyn zapadów – jednofazowego zwarcia – nie może być dłuższy niż kilkanaście ms, aby punkt reprezentujący to zaburzenie był zawarty w dopuszczalnych granicach. Wynika z niej także, jak bardzo ważny jest, z punktu widzenia redukcji negatywnych skutków tego zaburzenia, czas zadziałania systemów zabezpieczeń zwarciovych.

3. PRZYCZYNY ZABURZENIA

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

- zwarcia systemowe lub zwarcia w samych instalacjach;
- procesy załączania odbiorników dużej mocy;
- zmiany konfiguracji sieci;
- pracę odbiorników o zmiennym obciążeniu (szczególnie biernym).

3.1 Zwarcia systemowe lub zwarcia w instalacjach odbiorcy

Zwarcia mogą być jednofazowe (najczęściej) lub rzadsze dwu- i trójfazowe. Mogą występować zarówno w sieciach transmisyjnych jak i rozdzielczych, a także w instalacjach odbiorców. Powodują przetężenia prądowe, skutkiem których są spadki napięć na impedancjach systemu i w konsekwencji zapady napięcia. Przyczyny zwarć można podzielić na:

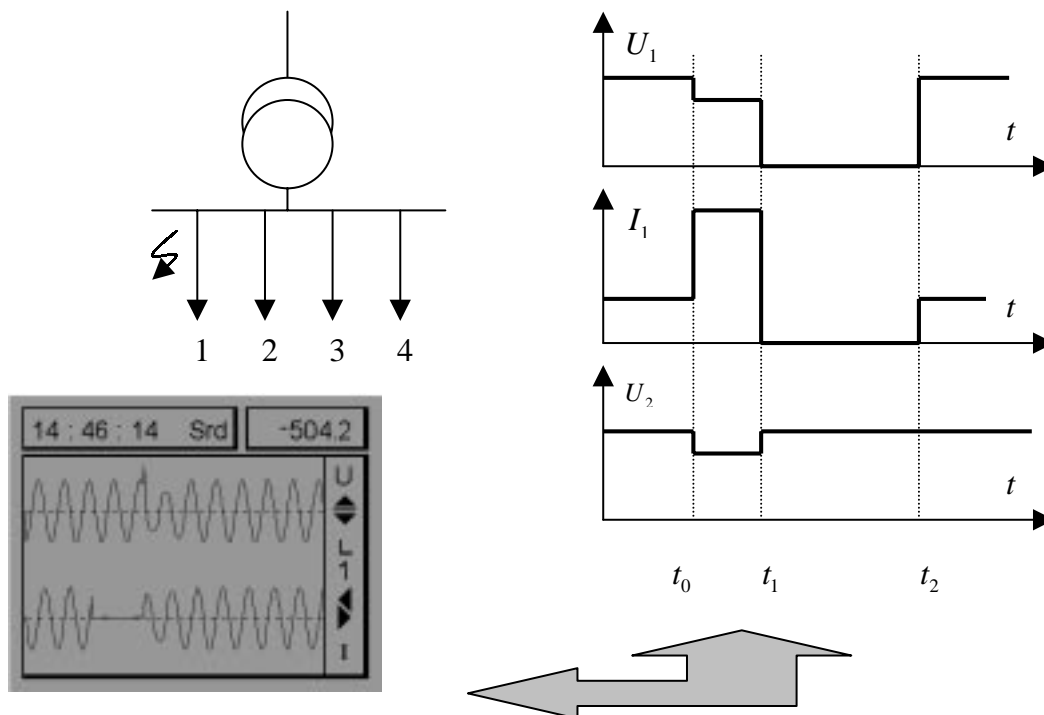
- zewnętrzne, a wśród nich na naturalne, niezależne od pracy systemu zasilającego tj. wyładowania atmosferyczne (przyczyna 50-80% zwarć w liniach), mgła, sadz, śnieg, itp.

⁶ <http://www.itic.org>

oraz przypadkowe o incydentalnym charakterze (drzewa, zwierzęta, wypadki komunikacyjne i konstrukcyjne, itp.).

- wewnętrzne, mające swe źródło w systemie zasilającym np. uszkodzenia izolacji kabli, transformatorów, łączników, zwarcia manewrowe powodowane błędami ludzi lub niewłaściwym działaniem urządzeń elektroenergetycznych itp.

Większość zwarć w systemie jest eliminowana poprzez działanie zabezpieczeń. W typowych rozwiązaniach wyłączniki na rozdzielniach powodują odłączenie 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 w stosunku do miejsca zwarcia oraz praktyki eliminacji zwarć..



Rys. 4 Procedura działania układu zabezpieczeń (t_0 - chwila pojawienia się zwarcia; ($t_0 - t_1$) - detekcja zwarcia i czas zadziałania zabezpieczenia; ($t_1 - t_2$) - czas wyłączenia zwartej linii; t_2 - czas ponownego załączenia, zwarcie jest wyeliminowane)⁷

Systemy zabezpieczeń są tak projektowane, 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. Rysunek 4 przedstawia typowy system rozdzielczy z pewną liczbą linii zasilanych ze wspólnych szyn. Zwarcie na 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 zmaleje natychmiast do zera. Staje się to często stopniowo ze względu na obecność maszyn wirujących. Przez krótki okres czasu maszyny te będą pracować jako generatory przekazujące energię do linii zasilającej.

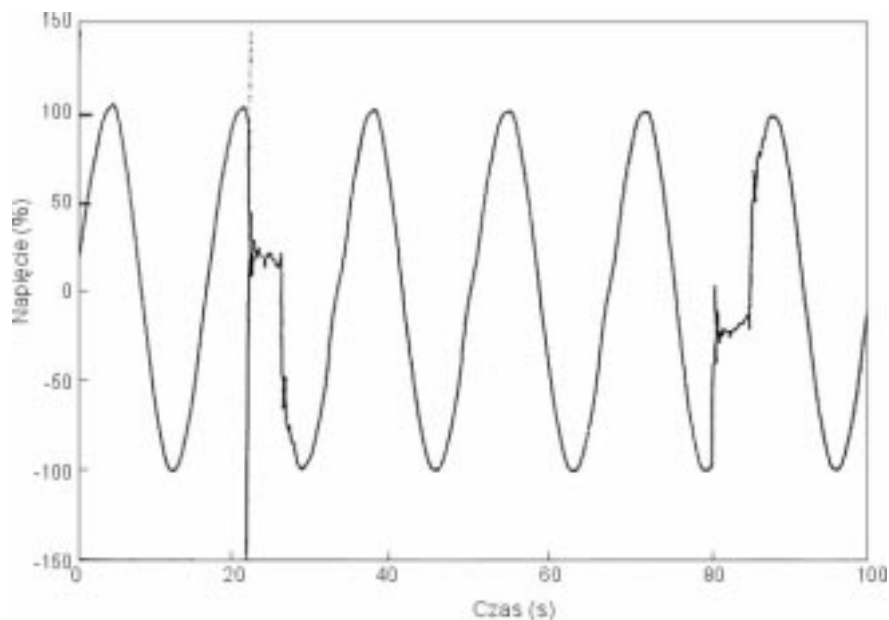
W przypadku automatyki ponownego załączenia odbiorcy równoległych linii mogą doświadczyć kilku zapadów napięcia trwających od pojedynczych do kilkunastu okresów w zależności od stosowanej praktyki eliminacji zwarć.

⁷ Kształt przebiegu czasowe zapadu napięcia oraz występujący wówczas prąd zarejestrowano miernikiem AS-3 produkcji firmy *Twelve Electric*. Miernik ten umożliwia gromadzenie w rejestrze zdarzeń ostatnie 4000 przekroczeń zadanych przez operatora, granicznych wartości skutecznych napięć wraz z amplitudą zaburzenia oraz datą i czasem jego wystąpienia.

Liczbę zwarć (tym samym zapadów napięcia i przerw w zasilaniu) można zmniejszać (nie całkowicie eliminować) poprzez:

- właściwą eksploatację systemu polegającą na ciągłej konserwacji i modernizacji sieci;
- instalowanie odgromników;
- redukcję długości linii napowietrznych;
- zamykanie sieci w układzie pętli;
- ograniczenie prądów zwarciovych poprzez zwiększenie impedancji obwodu zwarcia itp.

Wyładowania atmosferyczne należy traktować głównie jako źródło przepięć i w konsekwencji przemijających zwarć – rysunek 5.



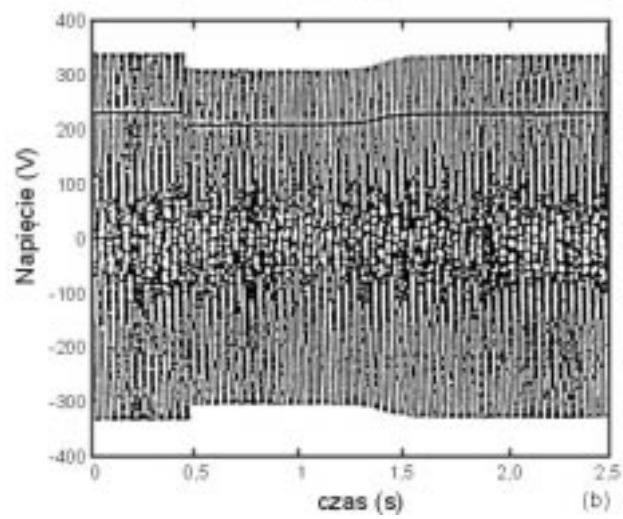
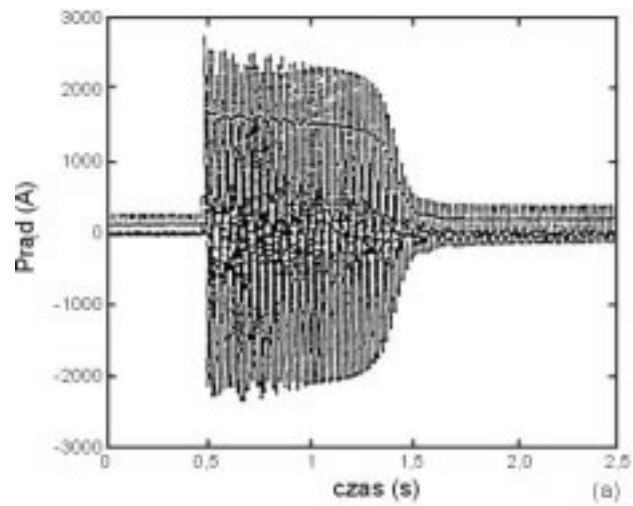
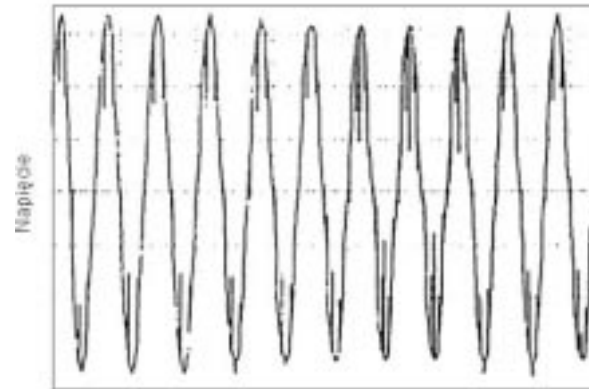
Rys. 5 Przykładowy zapad napięcia spowodowany wyładowaniami atmosferycznymi. Widać wyraźnie dwa oddzielne zwarcia wywołane kolejnymi wyładowaniami.

3.2 Proces załączania odbiorników dużej mocy

Dotyczy to w szczególności rozruchu silników elektrycznych. Napięcie w linii zasilającej, w której dokonywany jest rozruch, maleje 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. Jest on największy w początkowym okresie, po czym zanika wraz ze wzrostem prędkości silnika. Prąd ten i związany z nim spadek napięcia na impedancji sieci zasilającej jest więc największy na początku rozruchu silnika, a następnie jego wartość ulega redukcji (rys. 6). W tym przypadku zapad napięcia ma przewidywalny charakter i stąd względnie łatwe zaprojektowanie układu napędowego i układu zasilania w taki sposób, aby rozruch napędu nie powodował znaczących zaburzeń. Jest to problemem o charakterze głównie lokalnym i z reguły nie wpływa na pracę zbyt dużej liczby innych odbiorników.

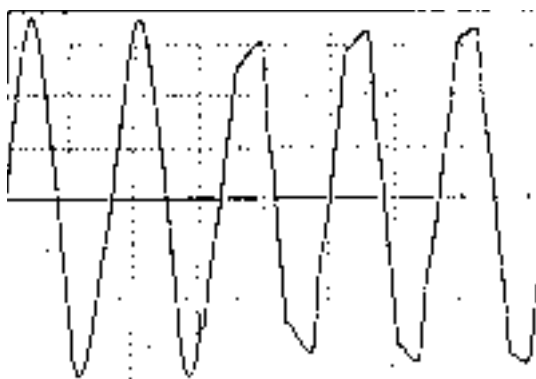
Stosowane są różne sposoby złagodzenia rozruchu tj.: rozrusznik gwiazda/trójkąt, rozruch rezystancyjny i reaktancyjny, rozruch autotransforowy, szeregowe lub równoległe łączenie uzwojeń w silnikach z dzielonymi uzwojeniami, układy “soft-start” itp.

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



Rys. 6. Przykładowe załamania napięcia spowodowane rozruchem silnika prądu:
 (a) stałego i (b) prądu przemiennego

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy przebieg zapadu napięcia spowodowany przełączeniem odbiornika z sieci zasilającej na zaciski UPS.



Rys. 7. Zapad napięcia wywołany przełączeniem odbiornika z sieci zasilającej na zaciski UPS

4. SKUTKI ZABURZENIA

Są zależne od wielu czynników wśród 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 jeżeli zapad będzie trwał zbyt długo. Skutki mogą być bardzo znaczące zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia.

Z pośród 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: (a) aparaturę łączeniową; (b) układ energoelektroniczny; (c) układ pomiarowo-sterujący.

4.1 Aparatura łączeniowa - styczniki i przekaźniki

Niezależnie od aplikacji występuje zawsze problem, gdy stycznik/przekaźnik rozłączy się w sposób niezamierzony podczas zaburzenia elektromagnetycznego. Prowadzi to zwykle do niekontrolowanego przerwania procesu. Wielu wytwórców podaje, że ich styczniki odpadają przy 50% napięcia znamionowego (U_N) jeżeli te warunki trwają dłużej niż jeden okres (McGranaghan 1995). 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 przesuwają 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 ruchomych części sprawiają, że pracuje on prawidłowo również w tych przedziałach wartości prądu, w których siła przyciągania maleje poniżej minimalnej wartości podtrzymania. Tak więc podczas normalnej pracy styki stycznika pozostają w pożądanym stanie. Wystąpienie nieprawidłowości w jego działaniu wymaga równoczesnego wystąpienia kilku niekorzystnych czynników wśród których

wymienić należy, prócz amplitudy zapadu oraz czasu jego trwania, także punkt przebiegu czasowego napięcia w którym rozpoczyna się zapad (faza początkowa zaburzenia) oraz punkt w którym napięcie wraca do pierwotnej wartości (faza końcowa zaburzenia). Nagła zmiana napięcia podczas zaburzenia powoduje bowiem złożony przebieg czasowy prądu w cewce (Turner i inni, 1996).

Podczas zapadu występuje składowa stała prądu mająca zasadniczy wpływ na zachowanie się stycznika. Nawet niewielka wartość tej składowej w napięciu powoduje przepływ znaczącego prądu stałego (*dc*). Nawet mała jego wartość może spowodować podtrzymanie stycznika przy prądzie o mniejszej wartości skutecznej niż w przypadku prądu zmiennego bez składowej stałej. Dodatkowo, składowa *dc* pozwala uniknąć strat związanych z histerezą obwodu magnetycznego i w ten sposób pozwala uzyskać większą średnią wartość strumienia.

Nie istnieje żadna norma (mimo, że podjęto już próby jej opracowania) która określałaby wartość napięcia przy którym stycznik silnika powinien odłączyć napęd. Niektórzy producenci podają takie dane, lecz najczęściej powstają problemy z ich interpretacją. Przykładowo, zasadnicza jest różnica w zadziałaniu zabezpieczenia napędu w przypadku stopniowej i skokowej redukcji wartości napięcia.

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, bowiem zmagazynowana w nich energia jest mniejsza oraz mniejsza jest inercja ich ruchomych części.

Dążenie do redukcji wymiarów aparatury łączeniowej prowadzi często w konsekwencji do urządzeń o mniejszej wartości gromadzonej energii i tym samym mniej odpornych na zapady napięcia.

W układach rozruchowych silników ŚN stosowane są z reguły cewki prądu stałego zasilane z sieci prądu przemiennego poprzez prostowniki. Ich odporność na zapady jest większa niż styczników prądu przemiennego.

4.2. Regulowane napędy

Stanowią jeden z największych problemów podczas zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu. Są szczególnie czułe na ten rodzaj zaburzenia, a ich znaczące moce jednostkowe czynią wszelkie sposoby redukcji skutków zaburzenia problemem trudnym technicznie i najczęściej bardzo kosztownym. Negatywny efekt jest natychmiastowy, nie tak jak jest w przypadku innych rodzajów zaburzeń tj. 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 niesinusoidalnej natury 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 oprogramowaniem jak i sprzętem)⁸.

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

Pierwsza to zasilanie układu sterowania napędu. Jeżeli jego zasilacze nie są w stanie 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

⁸ Nie ma obecnie normy która charakteryzowałaby reakcję regulowanych napędów na zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu.

podtrzymania zasilania układu pomiarowo-sterującego.

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

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

Reakcja napędu na zapady napięcia jest, prócz wielkości opisujących zaburzenie, także funkcją rodzaju obciążenia oraz parametrów napędu. Pewne procesy mogą tolerować znaczące zmniejszenie prędkości i momentu silnika. Inne takich zmian nie dopuszczają. Wiele z nich wymaga precyzyjnej i dokładnej kontroli takich wskaźników jak np. ciśnienie, temperatura, przepływ itp. Ponieważ większość tych procesów jest napędzana przez silniki elektryczne, moment i prędkość silnika bezpośrednio wpływa na zmienne procesu.

Napędy prądu stałego

Skutki zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu są szczególnie poważne w przypadku napędów prądu stałego z przekształtnikami *ac/dc* i inne w porównaniu do napędów prądu przemiennego. Na szczęście napędy te są obecnie mniej powszechne, jakkolwiek duża ich liczba jest jeszcze w użyciu.

Nie sterowane prostowniki są uważane za praktycznie nieczułe na zapady napięcia. Jednakże w przypadku obciążonych prostowników z filtrem pojemnościowym po stronie prądu stałego może wystąpić problem podczas powrotu napięcia po zapadzie do pierwotnej wartości. W czasie zapadu kondensator rozładowuje się. Jeżeli nie są podjęte żadne działania zabezpieczające, wówczas podczas powrotu napięcia duża wartość prądu ładowania może być niebezpieczna dla prostownika. Z tego między innymi powodu stosowane są zabezpieczenia podnapięciowe w obwodzie prądu stałego wyłączające urządzenie w przypadku zbyt głębokiego i/lub zbyt długiego zaburzenia w napięciu.

Wg (Caldon i inni 1994) nie nawrotne sterowane prostowniki są w większości przypadków czułe na załamania napięcia o czasie trwania dłuższym od kilku ms i amplitudzie załamania większej niż 20%. Tylko w szczególnych warunkach mogą one tolerować redukcję napięcia do 50-60% wartości znamionowej. Nawrotne przekształtniki są mniej odporne i zwykle zapady napięcia o amplitudzie większej niż 15% mogą spowodować awarię tych urządzeń.

W przypadku regulowanych prostowników o sterowaniu fazowym, podczas zapadu napięcia pętla sprzężenia zwrotnego stara się podtrzymać stałe napięcie wyjściowe poprzez zmniejszenie kąta wysterowania tyrystorów. W większości przypadków, podczas długich i głębokich zapadów, napięcie to maleje zmniejszając w konsekwencji prędkość silnika. Przy powrocie napięcia sieci, dla granicznych wartości kątów wysterowania tyrystorów i zakłóconej synchronizacji z siecią zasilającą może wystąpić przetężenie prądowe powodując zadziałanie systemu zabezpieczającego.

W przypadku niesymetrycznych zapadów, amplituda pewnych napięć zasilających maleje, wówczas regulator prądu przy stałym momencie obciążenia powoduje zwiększenie kąta przewodzenia tyrystorów i to może spowodować większe obciążenie prądowe tych półprzewodników które są zasilane z faz których napięcia nie uległy zmianie. Napęd może zostać wyłączony zabezpieczeniem nadprądowym.

Inną przyczyną prądowego przetężenia, a zarazem zasadniczym problemem przekształtników *ac/dc* jest synchronizacja ich układów regulacji która wymaga precyzyjnej detekcji przejścia odpowiednich napięć przez wartość zerową. Skok fazy towarzyszący zapadom napięcia, zmienia regularność odstępów pomiędzy punktami naturalnej komutacji i może powodować utratę synchronizacji pomiędzy układem sterowania i siecią zasilającą.

Podczas zapadów napięcia szczególnie istotne jest zachowanie się przekształtnika będącego w zakresie pracy inwertorowej. Brak lub redukcja wartości napięcia sieci zmniejsza wartość

napięcia na zaciskach silnika i wówczas, w celu podtrzymania takiego samego efektu hamowania, sprzężenie zwrotne przekształtnika zwiększa automatycznie kąt sterowania. Istnieje realna groźba przerzutu falownikowego z wszelkimi niekorzystnymi skutkami tego zjawiska. Standardowo komercyjnie dostępny regulowany napęd prądu stałego jest wyposażony w podnapięciowe i nadprądowe zabezpieczenia. Gdy którekolwiek z zabezpieczeń zostanie

pobudzone, blokowane są wówczas impulsy wyzwajające, w ten sposób silnik pozbawiony jest zasilania. Urządzenie jest chronione przed uszkodzeniem, jednakże realizowany proces zostaje przerwany. Stąd potrzeba takich rozwiązań które zwiększą odporność napędu pozwalając przedłużyć czas jego pracy podczas zaburzenia do kilkunastu okresów, co w większości przypadków jest czasem wystarczającym.

Napędy prądu przemiennego

Odporność na zapady napięcia typowego regulowanego napędu prądu przemiennego z pośrednim przemiennikiem częstotliwości VSI (*voltage source inverter* – rys. 8a) i diodowym mostkiem wejściowym jest z reguły znaczna, bowiem kondensator i zgromadzona w nim energia jest zdolna do czasowej kompensacji zmiany napięcia zasilającego (przy założeniu krótkiego czasu trwania i małej amplitudy zaburzenia).

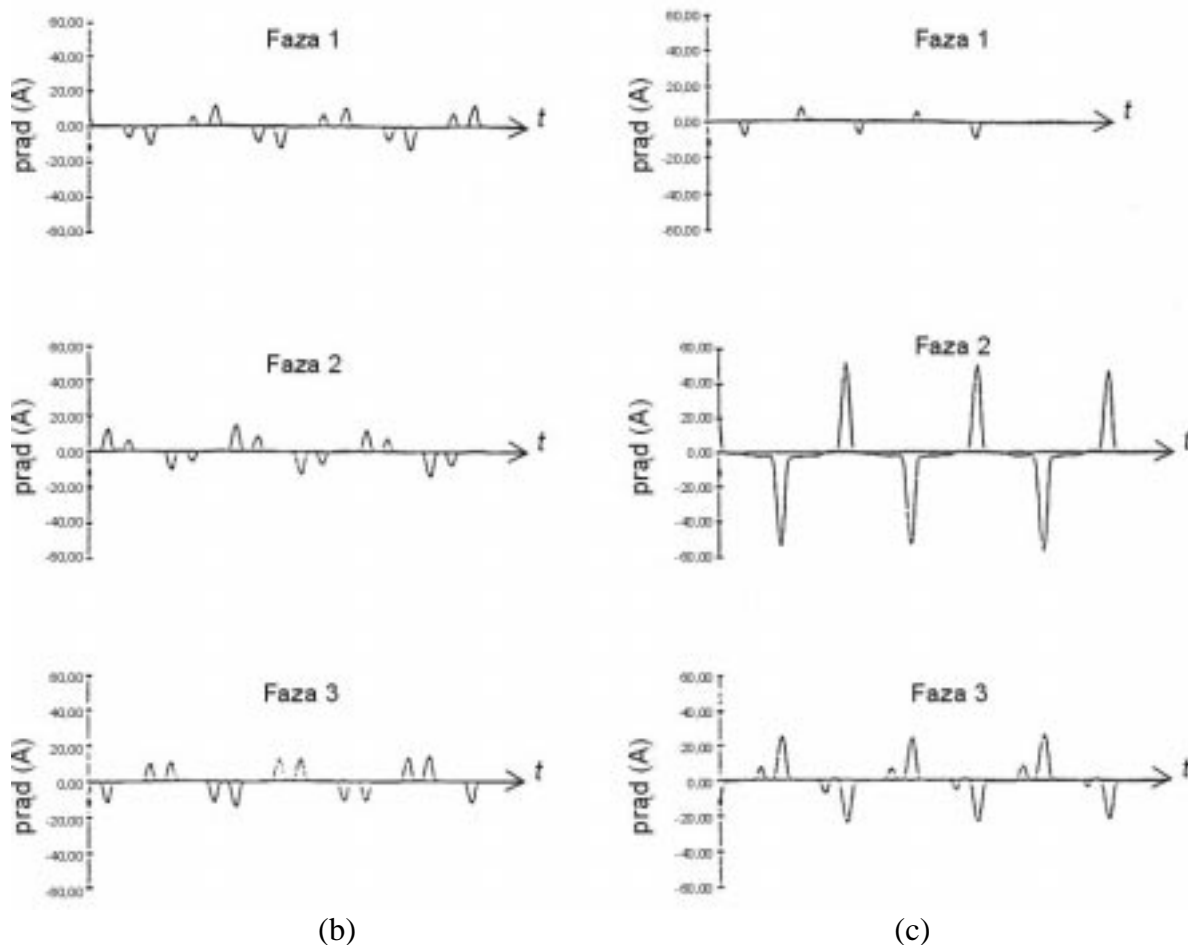
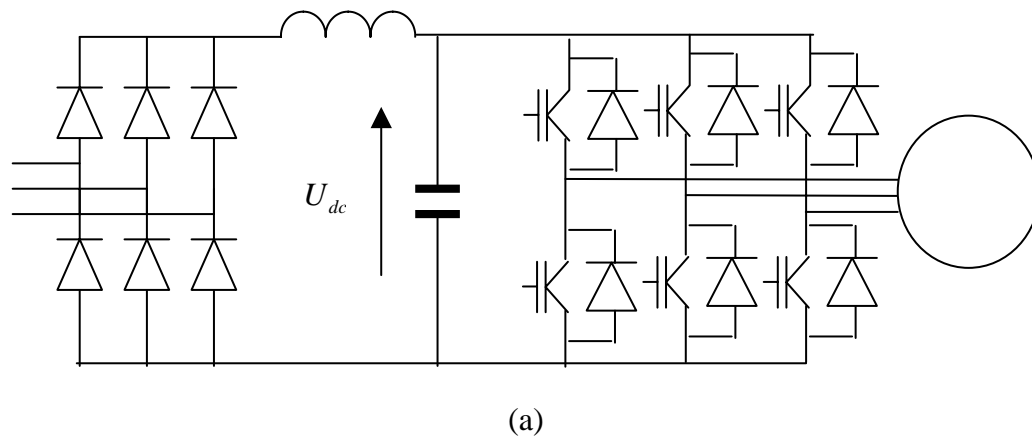
Gdy napięcie wejściowe jest symetryczne, diody w mostku wejściowym podejmują przewodzenie w sposób regularny, a prądy wejściowe mają symetryczne przebiegi (rys 8b).

W przypadku gdy napięcia fazowe są niesymetryczne, np. jak ma to miejsce podczas jednofazowego zwarcia, przewodzenie diod mostka wejściowego nie jest regularne (rys. 8c)⁹. W rzeczywistych warunkach maksymalne napięcia jednej lub więcej faz są zredukowane do wartości mniejszej niż znamionowe napięcie kondensatora, stąd nie ma transmisji energii z sieci zasilającej do kondensatora. Ten ostatni rozładowuje się do chwili gdy kolejny szczyt napięcia stworzy warunki do jego doładowania. Ponieważ kondensator rozładowuje się wówczas w stopniu większym niż normalnie, prąd płynący z sieci w celu jego doładowania będzie duży¹⁰. Występują przedziały czasu w których trójfazowy mostek pracuje jak urządzenie jednofazowe podłączone pomiędzy dwie linie zasilające o największej wartości napięcia międzyfazowego. Prądy zawierają 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 bezpieczników. Występuje to 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 spowodować zadziałanie bezpieczników nawet w przypadkach, gdy to zaburzenie nie jest wystarczająco duże, aby spowodować znaczącą redukcję napięcia w obwodzie pośredniczącym przemiennika. Właściwa koordynacja bezpieczników oraz stosowanie dławików sieciowych pozwala często w praktyce skutecznie wyeliminować tę eksploatacyjną niedogodność. Należy podkreślić, że do momentu wyłączenia napędu przebiegi czasowe napięć wyjściowych inwertera pozostają praktycznie niezmiennie.

⁹ Ponieważ napięcie kondensatora w obwodzie prądu stałego osiąga poziom prawie równy wartości szczytowej napięć międzyfazowych, jednofazowe doziemienie w większości przypadków nie powoduje zmniejszenia napięcia stałego poniżej progu zadziałania zabezpieczenia podnapięciowego, ponieważ nadal jest wystarczająco duża wartość napięć międzyfazowych. W takich przypadkach napęd zostaje jednakże często wyłączony, bowiem albo obwód sterowania jest nieodporny, albo aparatura łączeniowa (styczniki, przekładniki) nie posiada wystarczającego stopnia odporności, albo w sieci zasilającej instalowane są zabezpieczenia przed doziemieniem fazy (szczególnie istotne w sieciach z izolowanym punktem zerowym).

¹⁰ W pewnych przypadkach jego wartość skuteczna w jednej fazie może przekroczyć nawet 200% prądu znamionowego, a wartość szczytowa tego prądu może przekroczyć krotność 4 (Mansoor i inni, 1996).



Rys. 8. Schemat ideowy pośredniego przemiennika częstotliwości (VSI) (a) oraz przykładowe przebiegi czasowe prądów wejściowych dla: (b) symetrycznych i (c) niesymetrycznych napięć zasilających

W przypadku zapadu podczas którego nie jest dostępna energia z systemu zasilającego (np. trójfazowe zwarcie), energia zgromadzona w obwodzie pośredniczącym prądu stałego dc (w kondensatorze) jest absorbowana przez silnik w kilku okresach i napięcie stałe kondensatora U_{dc} maleje do zera, w typowym czasie kilkudziesięciu ms (David i inni 1994). Prędkość silnika zmniejsza się z pochodną zależną od momentu bezwładności i momentu obciążenia mechanicznego zredukowanych na wał silnika.

Większość napędów posiada 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 gdy napięcie stałe zmniejszy się poniżej przyjętej wartości progowej (zwykle 75-90% wartości

znamionowej). Gdy napięcie powróci ponownie do swojej 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 możliwość wystąpienia zmiany momentu niekorzystnej dla napędzanego silnikiem agregatu.

W dużej liczbie napędów, szczególnie starszej generacji, układy sterowania i zabezpieczeń zasilane były z sieci *ac*, 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 zasilane są bezpośrednio z tego napięcia. Gwarantuje to kontrolę pracy napędu do chwili jego całkowitego wyłączenia dzięki dużej energii zgromadzonej w kondensatorze. Napięcia zasilające *ac* są wówczas często poza kontrolą, lecz układy są mniej czułe na zaburzenia.

W badaniach reakcji napędu na zapady napięcia (amplitudę, czas trwania itp.) pomija się często dwa istotne czynniki mające wpływ na przebieg tego zjawiska: moment obciążenia mechanicznego (np. o stałej lub zmiennej - w funkcji prędkości - wartości, stała moc obciążenia itp.) oraz bezwładność silnika i napędzanego agregatu. Przykładowo, przy stałej mocy mechanicznej na wale, prędkość silnika maleje podczas zapadu w większym stopniu niż w przypadku momentu o „kwadratowej” charakterystyce. Dla stałej mocy obciążenia mechanicznego moment silnika wzrasta podczas zmniejszania prędkości podczas gdy dla „kwadratowej” charakterystyki jest przeciwnie. Oczywisty jest również korzystny wpływ na pracę napędu dużego momentu bezwładności, ze wzrostem którego następuje zmniejszenie zmiany prędkości silnika podczas zapadu.

4.3 Sprzęt informatyczny

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 tego zaburzenia są: brak transmisji sygnałów lub błędy w ich przekazie¹¹. 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 (zmniejszanie) niż na nagłą przerwę zasilania. Niektóre detektory uszkodzeń nie reagują bowiem dostatecznie szybko na stopniową redukcję wartości napięcia zasilającego. Wówczas napięcie *dc* dla obwodów scalonych może zmniejszyć się do poziomu niższego niż minimalne napięcie pracy, zanim detektor uszkodzenia zostanie pobudzony. W efekcie dane mogą być utracone lub sfałszowane. Po powrocie napięcia sprzęt taki może nie być zdolny do poprawnego ponownego uruchomienia i wymagać przeprogramowania. Z tego powodu dla sprzętu informatycznego podano w normach szczegółowe procedury testowania jego odporności 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

¹¹ Możliwym, sygnalizowanym w literaturze, skutkiem jest także utrata synchronizacji napędów dysków.

przerwać ciągłość całego procesu technologicznego. Czas pojedynczego cyklu pracy PLC często nie przekracza 20ms, 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 napięcia 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 przy pomocy UPS, natomiast nie zawsze stosuje się to do koncentratorów.

Wejściowe urządzenia peryferyjne tj. przyciski, czujniki itp. są galwanicznie połączone z sterownikiem. Powszechny jest dyskretny charakter wejść. Napięcia progowe w oparciu o które ustalona jest wartość sygnału logicznego – 0 lub 1 – nie są standaryzowane. Np. 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 zadziałanie analogiczne do skutków jego zamierzonego uaktywnienia.

5. TECHNICZNE SPOSOBY PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM ZAPADÓW NAPIĘCIA

Na rynku jest obecnie dostępna bardzo duża liczba napędów, lecz nawet różne modele tego samego rodzaju napędu posiadają inną odporność na zapady napięcia. 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 (van Zyl A. 1998)¹². 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 konstrukcjach¹³.

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

- (i) zmiana sposobu eksploatacji napędu i modyfikacja jego sterowania,
- (ii) modyfikacja topologii układów energoelektronicznych,
- (iii) alternatywne zasilanie,
- (iv) instalowanie kompensującego sprzętu.

¹² Wiele eksploatowanych regulowanych napędów ulega awaryjnemu wyłączeniu nawet jeżeli napięcie zmniejszy się niewiele poniżej 90% w czasie dłuższym niż dwa okresy napięcia (*A guide ...EPRI TR-103208*).

¹³ Wg [Jouanne 1999] (również [van Zyll 1999]) miarą najbardziej pożądanej odporności napędu byłaby jego zdolność do pracy podczas zapadu o amplitudzie 50% i czasie trwania zawartym w przedziale 0,5-5s, przy zachowaniu stałej wartości prędkości i momentu.

W artykule ograniczono rozważania do dwóch pierwszych kategorii stosowanych do regulowanych napędów prądu przemiennego z pośrednim przemiennikiem częstotliwości typu VSI¹⁴. Działania dotyczą głównie:

- układów sterowania (zabezpieczenia poprawności pracy jednostki centralnej i urządzeń I/O, styczników, przekaźników, układów zasilania elektroniki sterującej itp.). Nie są to z reguły odbiorniki dużej mocy, lecz są one szczególnie wrażliwe na zaburzenia. Koszt zwiększenia ich odporności jest umiarkowany.
- układów energoelektronicznych. Są to obwody najczęściej znaczących mocy, stąd koszt przedsięwzięć z nimi związanych jest duży, a rozwiązania techniczne nie są trywialne.

5.1 Zmiana sposobu eksploatacji napędu i modyfikacja sterowania

Są to działania podejmowane po awaryjnym wyłączeniu napędu – na skutek zapadu napięcia lub krótkiej przerwy w zasilaniu. Ich celem jest bezpieczne i możliwie szybkie ponowne uruchomienie silnika. Należą do nich:

1 s p o s ó b

Ręczny lub automatyczny ponowny start napędu po upływie czasu zadanego opóźnienia podczas którego silnik zatrzyma się. Ta technika jest traktowana raczej jako podstawowe zabezpieczenie, a nie strategia w przypadku wystąpienia zaburzenia.

2 s p o s ó b

Szybkie zahamowanie napędu do zerowej prędkości, a następnie konwencjonalny ponowny rozruch. Stan przejściowy w prędkości napędu – o dużej pochodnej zmiany - może nie być tolerowany przez urządzenia wykonawcze sprzężone z silnikiem.

3 s p o s ó b

Automatyczny ponowny rozruch po zadanym czasie opóźnienia (typowo od 300ms do 2s w zależności od elektromechanicznej stałej czasowej wirnika). Odpowiada to czasowi potrzebnemu do zaniku napięcia na zaciskach stojana. Silnik nie jest wyhamowywany do zerowej prędkości, lecz ze względu na wprowadzoną zwłokę czasową, przed rozpoczęciem ponownego rozruchu wystąpi zazwyczaj znaczące zmniejszenie prędkości. Jeżeli inwerter nie jest zsynchronizowany z prędkością silnika, ponowny rozruch jest wolny w celu uniknięcia niebezpiecznych prądów przejściowych. Jeżeli prędkość jest znana (z czujnika prędkości lub układu identyfikacji jej wartości), ponowny rozruch jest bardziej efektywny, łagodniejszy i szybszy.

4 s p o s ó b

Zastosowanie strategii sterowania która utrzymuje inwerter zsynchronizowany względem napięcia silnika podczas zapadu. W chwili powrotu napięcia wystąpi bez opóźnienia czasowo optymalny rozruch. Redukcja prędkości jest minimalizowana i praca silnika jest kontrolowana również podczas załamania.

Wyszczególnione dalej sposoby nie są strategiami postępowania w przypadku awaryjnego wyłączenia napędu lecz *sensu stricte* technikami stosowanymi w celu zwiększenia jego odporności na załamania napięcia.

¹⁴ Pozostałe rozwiązania będą zaprezentowane w kolejnych artykułach. Stosowane są one bowiem także do redukcji skutków innych rodzajów zaburzeń elektromagnetycznych.

5 s p o s ó b

Polega na wykorzystaniu inercyjności obciążenia mechanicznego i modyfikacji sterowania w taki sposób, aby w przypadku gdy zaburzenie w zasilaniu spowoduje redukcję napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym (dc) przemiennika częstotliwości poniżej zadanej wartości granicznej, inwerter kontynuował pracę z częstotliwością niewiele mniejszą od częstotliwości sił elektromotorycznych stojana. Powoduje to przejście silnika w zakres hamowania. Napęd pobiera energię od wirujących mas - obciążenia mechanicznego i wirnika - w celu utrzymania napięcia szyn dc na pożądanym poziomie wartości¹⁵. Zaletą tego rozwiązania jest niski koszt realizacji związany z modyfikacją algorytmu sterowania inwertera. Podczas pracy napędu zachowana jest współfazowość napięć silnika i wyjściowych napięć inwertera oraz nie zanika strumień w silniku. Nie ma więc opóźnienia podczas przyspieszania napędu gdy zasilanie powraca do normalnego stanu. Wadami jest natomiast redukcja prędkości silnika i zmiana kierunku momentu na wale, co jest akceptowane np. w przypadku napędów pomp i wentylatorów, lecz może nie być akceptowane dla innych rodzajów obciążenia.

6 s p o s ó b

Polega na pracy napędu przy zmniejszonej prędkości/momentcie obciążenia mechanicznego. Ponieważ prąd w obwodzie pośredniczącym dc zmienia się wraz z częstotliwością napięć wyjściowych inwertera, dla obciążeń o zmiennym np. w funkcji prędkości wirowania momencie mechanicznym, redukcja prędkości silnika daje w rezultacie zmniejszenie wartości prądu dc . Układ napędowy pompy lub wentylatora pracujący z częstotliwością np. 40Hz będzie pobierał mniejszy prąd niż pracując z częstotliwością 50Hz. Będzie więc zdolny do pracy podczas dłuższego zapadu napięcia. Podobny efekt można uzyskać redukując moment obciążenia. Przykładowo redukcja prędkości do 50% (przy „kwadratowej” charakterystyce momentu obciążenia) oznacza prawie czterokrotny wzrost odporności napędu.

Zaletą rozwiązania jest praktyczny brak dodatkowych kosztów. Wadą natomiast jest zakres stosowania ograniczony tylko do obciążeń o zmiennych w funkcji prędkości wartościach momentów oraz tylko do tych przypadków w których realizowana technologia zezwala na redukcję prędkości.

7 s p o s ó b

Polega na stosowaniu silników o mniejszym napięciu znamionowym. Jeżeli 230V-wy silnik będzie zastosowany z przekształtnikiem np. 460V, wówczas napięcie na szynach dc (znamionowe 620V) może ulec zmniejszeniu np. do 45% (do 280V) i w dalszym ciągu inwerter dostarcza do silnika jego znamionowe napięcie - 230V¹⁶. Gdy napięcie zasilające ulegnie zmniejszeniu podczas zapadu, inwerter zmieni cykl przełączania elementów półprzewodnikowych w celu podtrzymania stałego napięcia na zaciskach silnika o pożądanej wartości 230V. Można również zastosować przewymiarowany napięciowo sterowany przekształtnik wejściowy pracujący z obniżonym napięciem wyjściowym dc . Pętla sprzężenia zwrotnego wg napięcia kondensatora dc gwarantuje stałe warunki napięciowe dla inwertera. Wadą tego rozwiązania jest, w przypadku zastosowania sterowania fazowego w tyrystorowym przekształtniku wejściowym, zmniejszenie współczynnika mocy układu napędowego oraz problemy z synchronizacją załączania tyrystorów podczas zapadu napięcia. Zaletą układu jest uzyskanie znaczącego wzrostu odporności napędu, wadami natomiast:

- większy koszt przemiennika wynikający z jego przewymiarowania (w rozważanym przykładzie dwukrotny),
- wzrost wymiarów silnika. Silnik 230V o takiej samej mocy jak silnik 460V wymaga przy pełnym obciążeniu prawie dwukrotnie większego prądu.

¹⁵ Wg [Jouanne 1999] napędy wyposażone w tę opcję sterowania, dostępne na rynku amerykańskim, są zdolne do utrzymania zadanego poziomu napięcia dla zapadów o amplitudzie nie większej niż 20% i czasie trwania do 2s.

¹⁶ Maksymalne napięcie wyjściowe inwertera wynosi $0,82U_{dc}$.

- wzrost wymagań dotyczących izolacji silnika. Musi ona być odporna na większe chwilowe wartości napięć występujące na zaciskach wyjściowych przemiennika 460V.

Techniki zwiększenia odporności stosowane w napędach zasilanych z sieci średniego napięcia (ŚN)

Większość tych napędów jest stosowana do pomp i wentylatorów. W układzie VSI dla napędów ŚN dominuje technologia przekształtników wielopoziomowych. Układy te można podzielić na:

- kaskadowe wielopoziomowe typu VSI (*cascaded inverter-type multilevel VSI* – CI-ML-VSI) – przykładowo trójpoziomowy na rysunku 9. Układy CI-ML-VSI zawierają kilka elementarnych modułów połączonych w szereg. Każdy moduł jest jednofazowym przekształtnikiem VSI. W układach tych często stosuje się, ze względów niezawodnościowych N+1 modułów, gdzie N jest liczbą modułów wynikającą z warunków napięciowych. Gwarantuje to zwiększoną odporność układu jako całości na zapady napięcia¹⁷.
- wielopoziomowe z punktem neutralnym (*neutral-point-clamped* – NPL). W układach tych wspólny obwód napięcia *dc* zasila wszystkie inwertory. W ich przypadku stosowane są różne sposoby zwiększenia odporności, z pośród których najkorzystniejszymi wydają się być: wykorzystanie inercyjności obciążenia, przekształtnik podwyższający napięcie w obwodzie *dc* oraz rozwiązania z elementami gromadzącymi energię jak np. koło zamachowe lub SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*).

5.2 Modyfikacja topologii układów energoelektronicznych

Celem zmian konstrukcyjnych jest uzyskanie takiej możliwości regulacji napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym, aby było ono, podczas wystąpienia zaburzenia, zawarte w dopuszczalnym przedziale zmian wartości. Należy również zapewnić właściwą wartość napięcia zasilającego układ sterujący. Rozwiązania spełniające głównie drugi warunek są powszechnie dostępne na rynku, znacznie trudniej uzyskać informację dotyczącą pierwszego zagadnienia tzn. zabezpieczenia obwodu siłowego. Istnieje kilka możliwych sposobów postępowania.

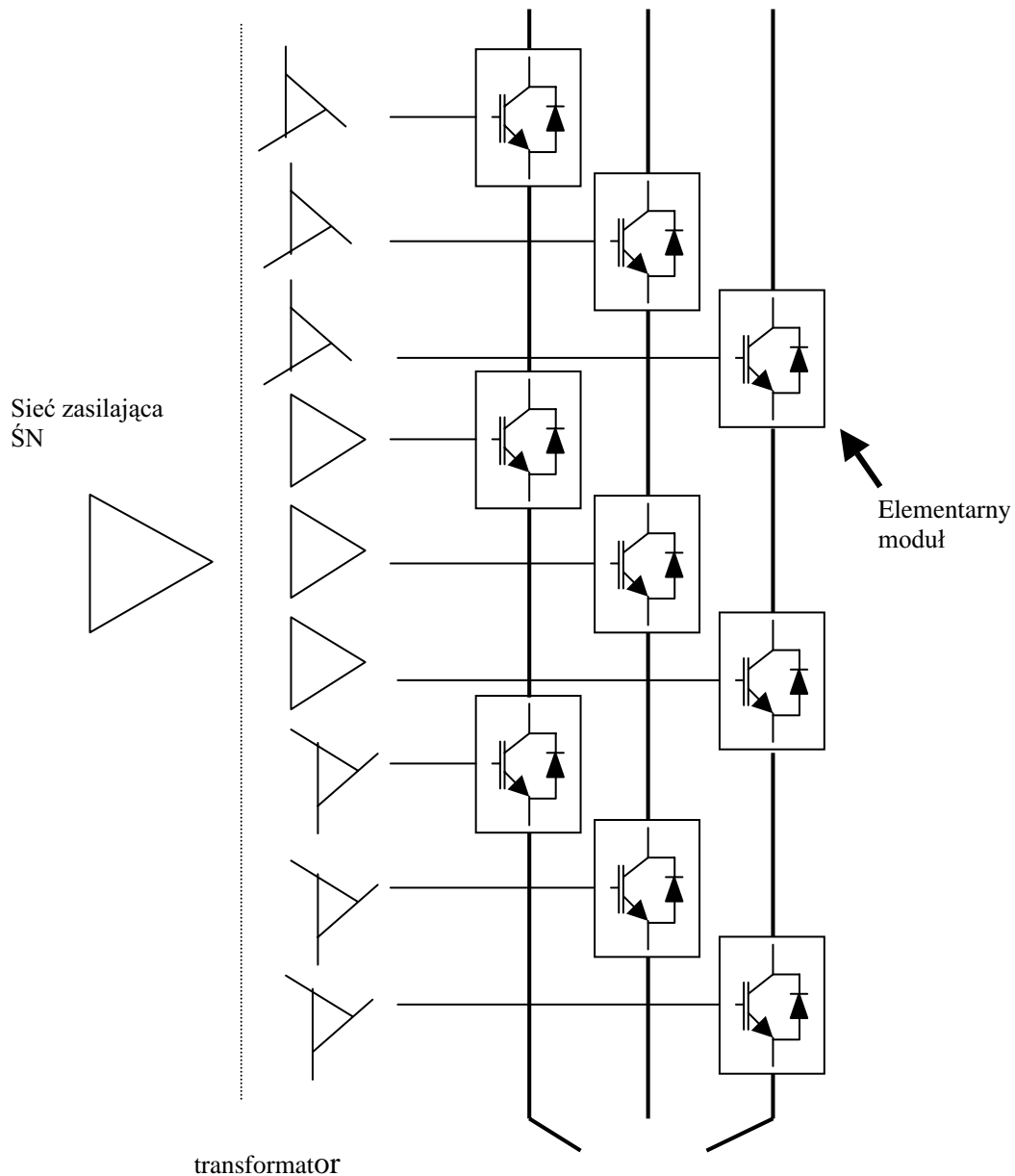
8 s p o s ó b – d o d a t k o w e k o n d e n s a t o r y l u b b a t e r i e w o b w o d z i e *dc*

W tym rozwiązaniu energia potrzebna dla poprawnej pracy napędu jest dostarczona podczas zapadu z baterii kondensatorów w obwodzie prądu stałego. Dla silnika o napięciu międzyfazowym $U = 460\text{V}$ i mocy $P = 7,36\text{ kW}$ pojemność w obwodzie pośredniczącym (*dc*) ma przykładową wartość $C_{dc} = 5000\mu\text{F}$. Wówczas napięcie stałe (przy założeniu ciągłego przewodzenia) wynosi:

$$U_{dc} = 1,35U = 620\text{ V}$$

Próg wyłączenia napędu w zabezpieczeniu podnapięciowym ustala się typowo na poziomie $0,9U_{dc}$, co w rozważanym przypadku wynosi $(U_{dc})_{gr} = 558\text{V}$. Wartość średnia prądu w obwodzie *dc*:

¹⁷ Układ dzięki odpowiednio skojarzonym uzwojeniom transformatora gwarantuje także bardzo korzystną wzajemną kompensację wyższych harmonicznych generowanych przez poszczególne moduły.



Rys. 9 Układ CI-ML-VSI dla napędów zasilanych z sieci ŚN

$$I_{dc} = \frac{P}{U_{dc}} = 12 \text{ A}$$

W przypadku zapadu napięcia lub krótkiej przerwy w zasilaniu energia przekazywana silnikowi pobierana jest z kondensatora. Dopuszczalny czas zaburzenia t_r można więc szacować z zależności:

$$t_r \approx \frac{C[U_{dc} - (U_{dc})_{gr}]}{I_{dc}} = \frac{5000 \cdot 10^{-6} (620 - 558)}{12} = 25,8 \text{ ms}$$

Rozważany napęd jest więc odporny na zaburzenia o czasie trwania nie dłuższym niż 1,29 okresu napięcia zasilającego (50Hz). Gdyby napęd miał być odporny na zaburzenie o czasie trwania $t_r = 0,5s = 25$ okresów, wówczas pojemność w obwodzie prądu stałego powinna wzrosnąć do wartości:

$$C_{dc} = \frac{I_{dc} t_r}{U_{dc} - (U_{dc})_{gr}} = \frac{12 \cdot 0,5}{620 - 558} = 0,097 \text{ F}$$

Oznacza to prawie 20-krotny wzrost pojemności i mimo niewątpliwej prostoty rozwiązania znaczący wzrost gabarytów i kosztów przemiennika¹⁸.

Na rynku amerykańskim oferowane są kondensatory specjalnej konstrukcji przeznaczone między innymi dla regulowanych napędów elektrycznych. Cechuje je bardzo duża gęstość energii w przeliczeniu na jednostkę objętości w stosunku do powszechnie dostępnych kondensatorów. Przykładowo dla silnika o mocy 100kW można zastosować baterię kondensatorów złożoną z ośmiu szeregowo połączonych modułów, każdy o pojemności 96,4F, napięciu znamionowym 56V i energii $E_C = 0,5CU^2 = 0,5 \cdot 96,4 \cdot (56)^2 = 151,2 \text{ kJ}$. Całkowita energia baterii wynosi więc $8E_C = 1,2 \text{ MJ}$. Przyjmując, że zaburzenie napięcia – krótka przerwa w zasilaniu (analiza najmniej korzystnego przypadku) – wywołuje zmianę napięcia dc do 70% wartości znamionowej można oszacować dopuszczalny czas t_r na podstawie równania:

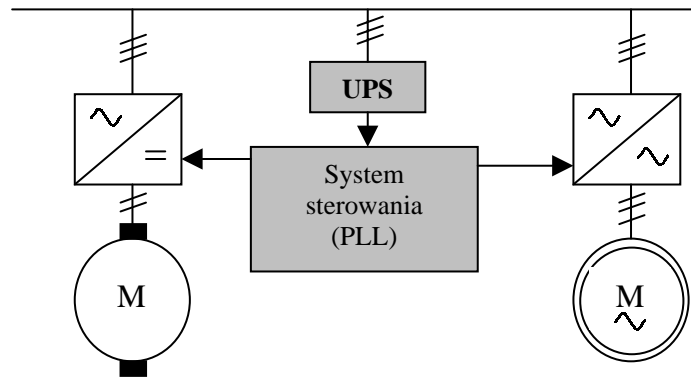
$$100kW \cdot t_r = 0,5 \cdot [CU^2 - C(0,7U)^2] \cdot 8$$

Dla $C=96,4F$ i $U=56V \Rightarrow t_r = 6s$. W rozważanym przypadku można więc skonstruować napęd odporny na zaburzenia o czasie trwania do 6s.

9 s p o s ó b

Prostym i zarazem bardzo skutecznym rozwiązaniem jest poprawa niezawodności pracy układów sterowania poprzez zastosowanie np. bezprzerwowego ich zasilania (UPS, rys. 10). Synchronizacja załączania elementów półprzewodnikowych – która jest problemem szczególnie sterowanych nawrotnych prostowników - może być zachowana podczas zapadów napięcia przez odtworzenie, przy pomocy oscylatora PLL, sinusoidalnego przebiegu o częstotliwości 50Hz. Dzięki temu praca napędu może być w wielu przypadkach bezawaryjnie kontynuowana po powrocie napięcia. Stosowanie pętli fazowej PLL do synchronizacji impulsów zapłonowych tyrystorów z napięciami sieci zasilającej jest powszechną praktyką. PLL jest układem drugiego rzędu i aby utrzymać go w warunkach stabilnej pracy niezbędne jest zastosowanie filtra o niskiej częstotliwości odcięcia. Reakcja na skok fazy napięcia zasilającego, a taki występuje nieomal zawsze podczas zapadu napięcia, jest ograniczona przez stałą czasową tego filtra, która dla systemów częstotliwości zasilania ma zwykle wartość kilkuset ms. W tym czasie PLL nie ma możliwości zareagować na skokową zmianę fazy napięcia i w konsekwencji może wystąpić nieprawidłowe załączenie tyrystorów.

¹⁸ Prócz ceny kondensatorów należy uwzględnić również koszt osprzętu związanego z rozładowywaniem baterii i jej zabezpieczeniami.



Rys. 10 Prosty sposób zwiększenia odporności napędów

Zasilacze urządzeń elektronicznych

Zasilacz *ac/dc*, z mostkiem diodowym i kondensatorem, jest powszechnie stosowany w układach sterowania i innych urządzeniach elektronicznych (komputery, systemy telekomunikacyjne, sterowniki programowalne itp.). Ich obciążeniem są zwykle przekształtniki *dc/dc* które zapewniają właściwe poziomy napięć zasilających dla końcowych urządzeń. Pewna energia jest zmagazynowana w kondensatorach zasilacza, lecz często gwarantuje ona bardzo krótkie autonomiczne zasilanie w przypadku wystąpienia zapadu. Napięcie *dc* maleje zwykle do zera w czasie kilkudziesięciu ms. Takie układy zasilające i zasilany przez nie sprzęt są więc bardzo czułe na zapady i przerwy w zasilaniu. Rozwiązaniem jest stosowanie dużych kondensatorów, *dc/dc* przekształtników o dużej tolerancji wartości napięcia wejściowego, UPS-ów lub dodatkowych generatorów.

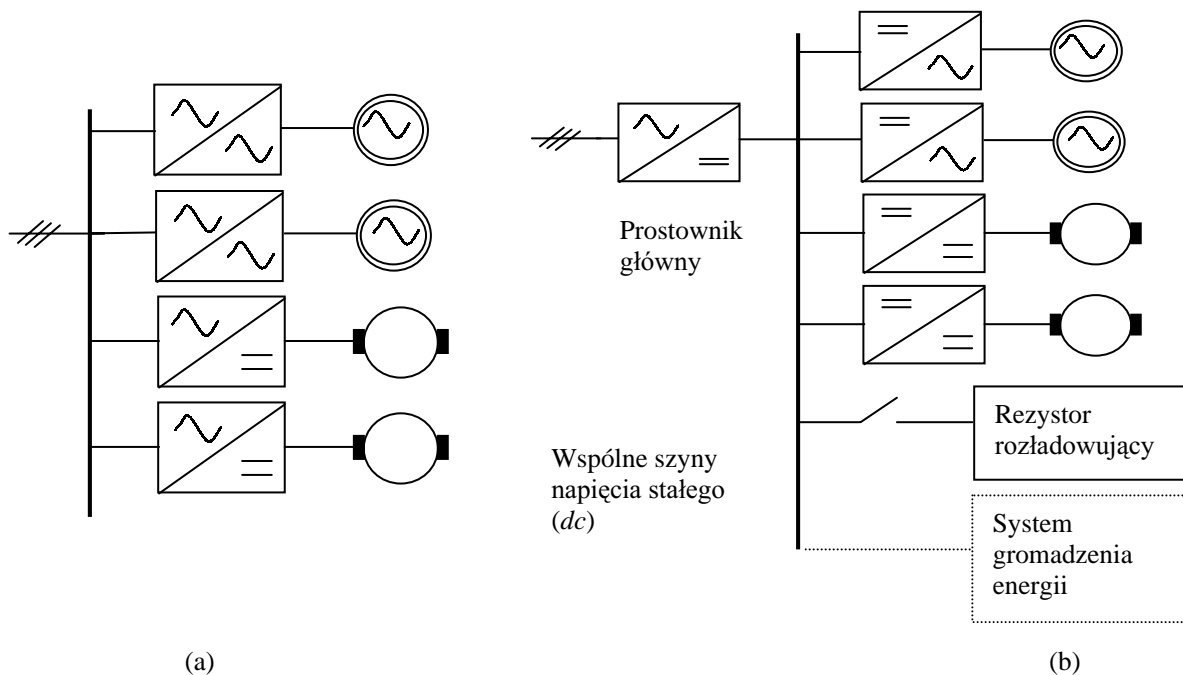
Styczniki

Stosowanie różnych sposobów zwiększenia odporności styczników na zaburzenia wymaga indywidualnej analizy każdego przypadku, szczególnie dla zasilania silników i regulowanych napędów podczas powrotu napięcia. Możliwe są następujące środki zaradcze:

- zasilanie styczników przez systemy bezprzerwowego zasilania (silnik-generator, UPS itp.);
- konwencjonalnie stosuje się styczniki *ac*. Istnieje możliwość zastosowania styczników z cewką prądu stałego zasilanych z sieci prądu przemiennego poprzez prostownik z dużym kondensatorem na wyjściu. Energia zgromadzona w kondensatorze umożliwia podtrzymanie stycznika podczas zapadów o znacznym czasie trwania (zależnym od wielkości kondensatora). Cechy konstrukcyjne styczników z cewkami na napięcie stałe gwarantują większą odporność na rozważany rodzaj zaburzeń (większa energia zgromadzona w polu magnetycznym rdzenia)

10 s p o s ó b

Polega na wytworzeniu wspólnych szyn *dc* dla zasilania wielu napędów jak na rysunku 11. Rozwiązanie to gwarantuje poprawne działanie, a równocześnie jest tańsze i ma mniejsze wymiary niż kilka niezależnych napędów. Stosowane jest głównie w przypadku wielosilnikowych procesów produkcyjnych, które są zasilane przy pomocy nawrotnych przekształtników gwarantujących regulację prędkości i wzajemną synchronizację pracy silników. W relacji do tradycyjnego rozwiązania w którym każdy przekształtnik jest przyłączony bezpośrednio do sieci zasilającej, w proponowanym rozwiązaniu wymiana energii pomiędzy napędami pracującymi w zakresie pracy silnikowej i generatorowej (hamowanie odzyskowe) odbywa się bezpośrednio poprzez wspólne szyny napięcia stałego i główny przekształtnik *ac/dc*. Moc tego ostatniego może być znacząco zredukowana. Dodatkowo może on być wyposażony w opcję aktywnej kompensacji harmonicznych i kompensacji mocy biernej, zwiększając tym samym wartość współczynnika mocy układu jako całości.



Rys. 11 (a) Typowy układ zasilania wielosilnikowych procesów; (b) układ ze wspólnymi szynami napięcia stałego (dc)

Rysunek 11a przedstawia typowy schemat wielosilnikowego procesu, podczas gdy na rysunku 11b zaprezentowano proponowane rozwiązanie. W przypadku zapadu napięcia lub przerwy w zasilaniu, może być realizowana zarówno pasywna jak i aktywna sekwencja sterowania. Przy braku napięcia z sieci, następuje automatyczne załączenie rezystora w celu kontroli napięcia dc . W ten sposób energia hamowania może być rozproszona na rezystorze. Można również zastosować aktywne sterowanie polegające na przyłączeniu do szyn dc układu gromadzącego energię np. baterii akumulatorów lub UPS. Zaletą, w stosunku do rozwiązania w którym każdy silnik jest zasilony z oddzielnego UPS jest to, że system gromadzenia energii może być wymiarowany tylko na nadwyżkę mocy czynnej ponad wymianę pomiędzy silnikami.

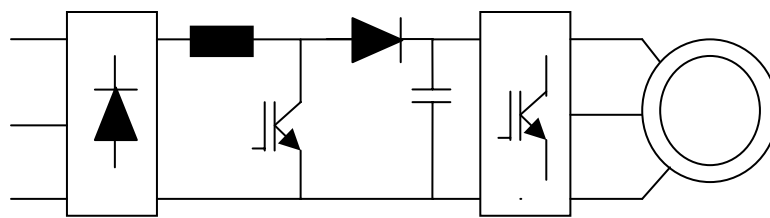
11 s p o s ó b

Dla jednofazowych zwarć i zapadów napięcia przy których istnieje możliwość dostarczania energii z sieci zasilającej, realnie technicznie jest wypracowanie takiej strategii sterowania która zagwarantuje wymagany poziom odporności napędu. Jedną z technik polega na kompensacji zmian napięcia w obwodzie prądu stałego w celu podtrzymania stałego momentu silnika.

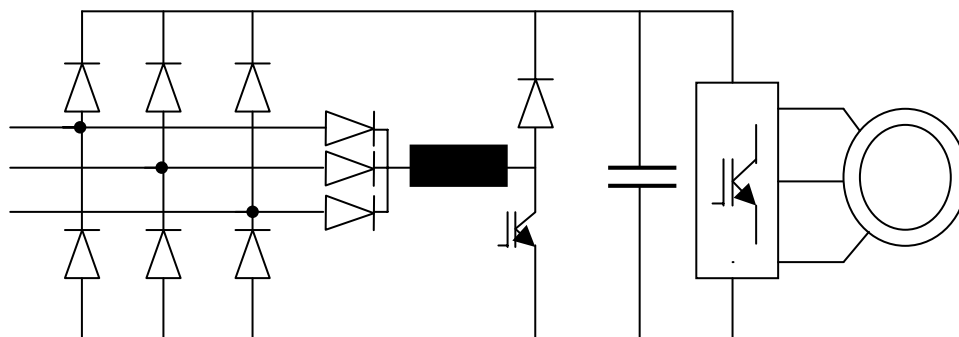
Kontrolę wartości napięcia w obwodzie dc można zrealizować w różny sposób.

przekształtnik stabilizujący napięcie w obwodzie pośredniczącym (dalej nazywany stabilizatorem) – rysunek 12.

Umieszczony pomiędzy prostownikiem i kondensatorem w obwodzie pośredniczącym prądu stałego gwarantuje, w przypadku wystąpienia zapadu, stabilizację napięcia dc na poziomie minimalnej wartości wymaganej przez inwerter. W rozwiązaniu tym niezbędny jest dodatkowy przekształtnik i odpowiednia strategia sterowania. Prostownik główny i stabilizator muszą być przewymiarowane w stosunku do mocy silnika. Przykładowo jeżeli napęd jest zaprojektowany tak, aby był odporny na zapady o amplitudzie 50%, prostownik i dodatkowy przekształtnik muszą mieć moc około dwukrotnie większą w relacji do mocy inwertera. W celu powiększenia odporności napędu można wprowadzić dodatkowy element gromadzący energię (np. kondensatory o większej pojemności lub baterie akumulatorów).



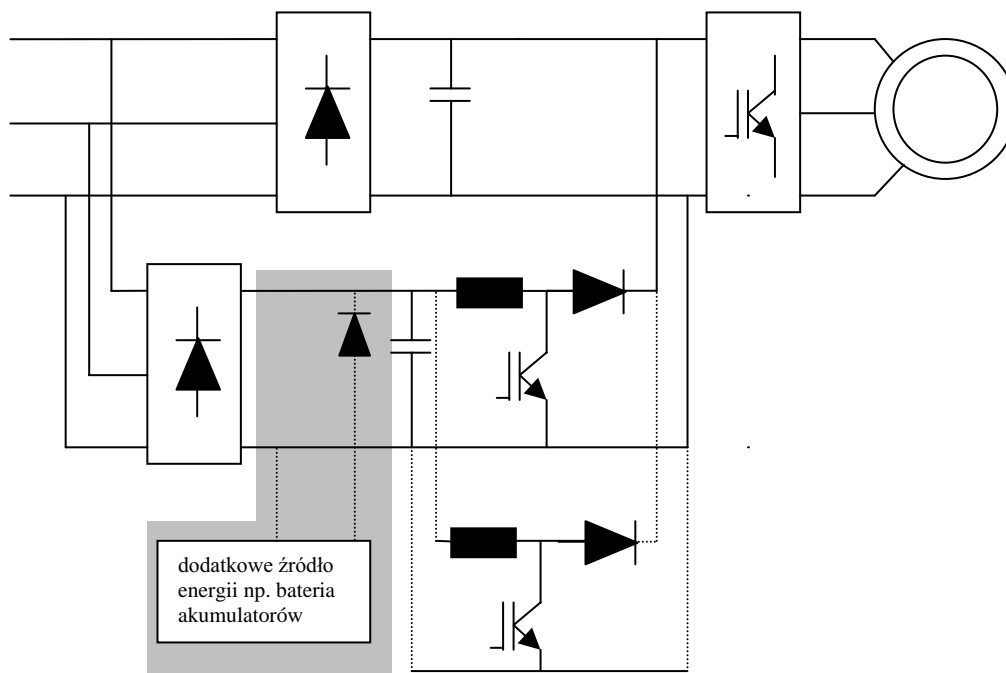
(a)



(b)

Rys. 12. Napęd prądu przemiennego z stabilizatorem napięcia *dc* w obwodzie prądu stałego w dwóch alternatywnych rozwiązaniach

W przypadku modernizacji istniejących napędów, prostownik i stabilizator mogą być połączone równoległe z prostownikiem głównym jak to pokazano na rysunku 13.



Rys. 13. Napęd prądu przemiennego z przekształtnikiem stabilizującym napięcie w obwodzie prądu stałego przyłączonym równoległe do głównego prostownika

Podczas zapadu energia jest dostarczana przez obwód równoległy, a napięcie *dc* kontrolowane przy pomocy stabilizatora. Równoległy obwód może być zasilany również z innego, rezerwowego źródła napięcia stałego (rys. 15).

Podczas zapadu układ sterowania stabilizatora stwierdza zmniejszenie napięcia stałego (*dc*) i rozpoczyna pracę w celu jego utrzymania na pożądanym poziomie wynikającym z warunków pracy inwertora. Zwykle napięcie wyjściowe stabilizatora jest ustalone na poziomie około 10% poniżej znamionowego napięcia szyn *dc*. Np. dla napięcia *ac* 460V napięcie znamionowe *dc* wynosi 620V i wówczas napięcie wyjściowe stabilizatora będzie przykładowo na poziomie 585V. Gdy napięcie w sieci obniży się o 10% obydwie przekształtniki tzn. w obwodzie głównym i stabilizator dostarczają energię do inwertora. Jeżeli redukcja napięcia będzie większa wówczas przekształtnik główny jest zablokowany i całą potrzebną energię dostarcza stabilizator¹⁹.

Są trzy zasadnicze różnice w projektowaniu prostownika w obwodzie głównym napędu oraz prostownika w obwodzie stabilizatora: wymiar prądowy, wymagane warunki chłodzenia oraz wartość pojemności w obwodzie *dc*.

Prostownik stabilizatora jest projektowany tak, aby dostarczał znamionową moc (czynną a nie pozorną) do napędu przy zmniejszonym napięciu np. do 50% napięcia znamionowego. Stąd jego bezpieczniki wejściowe i elementy półprzewodnikowe mają dwukrotnie większy wymiar prądowy w porównaniu z ich odpowiednikami w obwodzie głównym.

Zwykle stabilizator jest projektowany dla podtrzymania zapadu napięcia w ograniczonym czasie np. 2s. Relatywnie krótki czas jego pracy pozwala na zasadnicze zmniejszenie wymagań dotyczących systemu chłodzenia. Możliwe jest np. zastosowanie mniejszych radiatorów oraz mniej intensywnego przepływu powietrza wzdłuż radiatorów w porównaniu z prostownikiem głównym itp.

Pojemność w obwodzie *dc* stabilizatora może być znacząco mniejsza w porównaniu z przekształtnikiem głównym. Pełni ona zasadniczo rolę filtracyjną i jest przeznaczona do magazynowania energii co najwyżej w czasie jednego okresu, podczas gdy pojemność przekształtnika głównego jest zwykle wymiarowana na podstawie potrzeb energetycznych wynikających z krótkich przerw w zasilaniu.

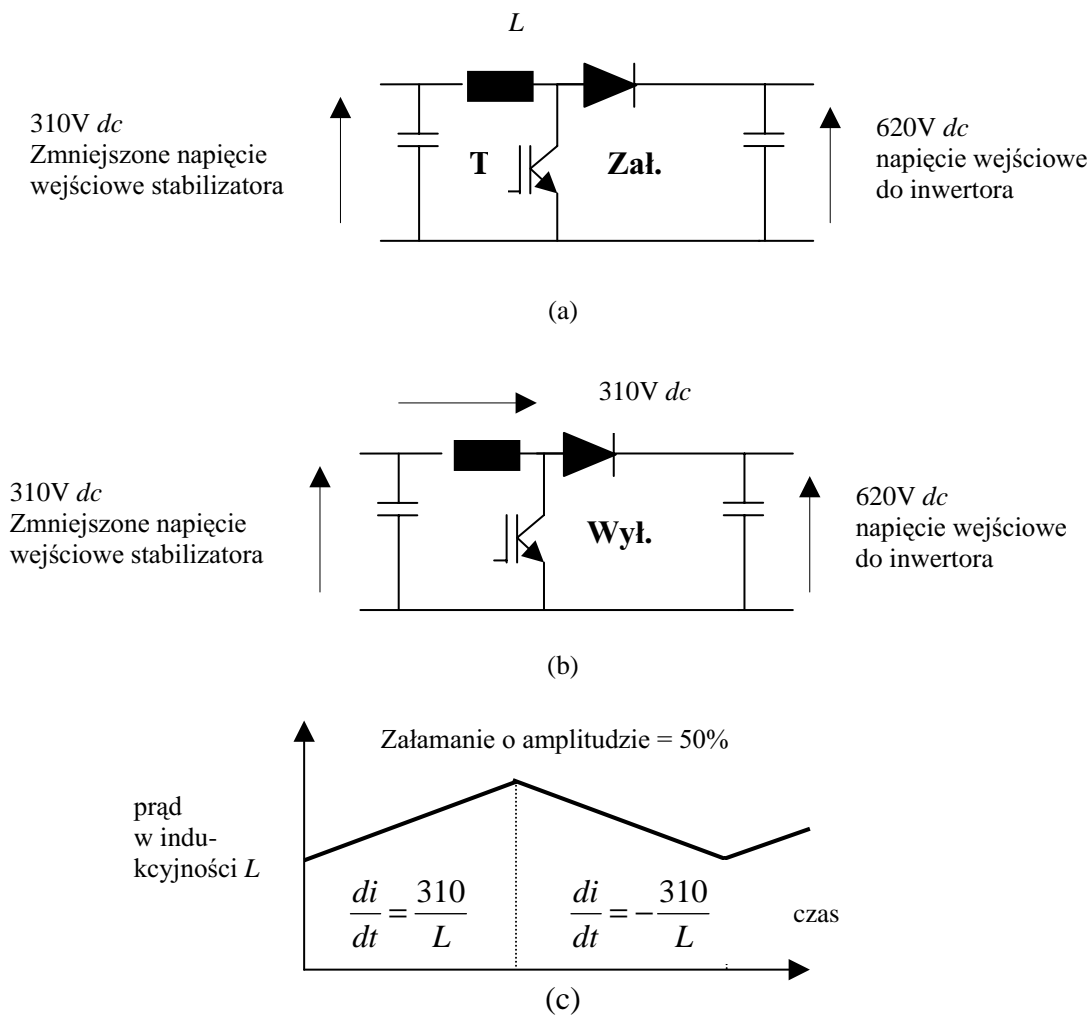
Jeżeli napięcie w sieci zasilającej (znamionowo równe 460V) zmniejszy się do 230V (załamanie o amplitudzie 50%), wówczas na szynach *dc* wystąpi napięcie 310V. Gdy napięcie to zmniejszy się poniżej 560V, podejmuje pracę stabilizator dostarczając energię do inwertora. Sekwencję pracy stabilizatora przedstawiono schematycznie na rysunku 14. Prąd w indukcyjności zaczyna wzrastać z pochodną $\frac{di}{dt} = \frac{310V}{L}$, gdzie *L* jest indukcyjnością

w obwodzie *dc*. Gdy prąd osiągnie zadaną maksymalną wartość tranzystor T wyłącza się. Indukcyjność *L* jest teraz przyłączona poprzez diodę do szyn *dc* przekształtnika. Napięcie na indukcyjności wynosi – 310V i prąd w dławiku zanika z pochodną $\frac{di}{dt} = -\frac{310V}{L}$. Energia

z dławika jest dostarczana do inwertora poprzez kondensator *dc* w obwodzie głównym. Częstotliwość pracy stabilizatora może wynosić kilka kHz. W przypadku zastosowania przekształtników pracujących równoległe (rys. 13) o przesuniętych w fazach cyklach pracy można uzyskać korzystne warunki filtracji składowych zmiennych i łączeniowych przez kondensator w obwodzie głównym.

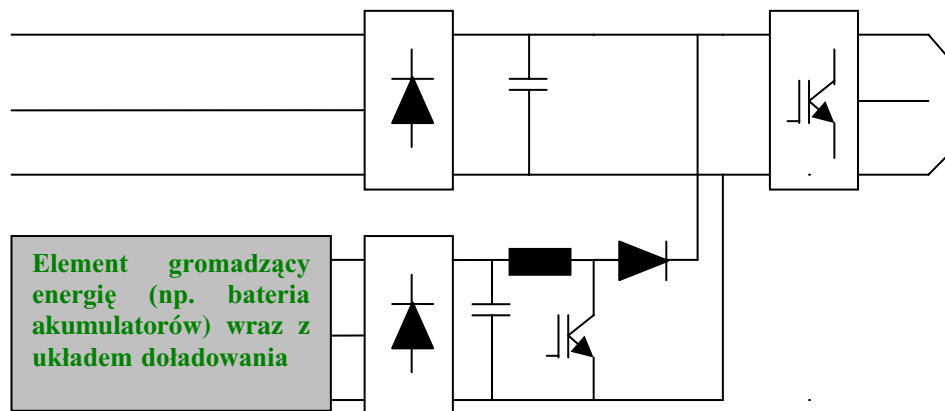
Zaletą tego rozwiązania jest tolerowanie przez układ zapadów napięcia o dużej wartości, do 50% przy nieograniczonym czasie trwania zaburzenia. Za wadę można uznać konieczność zastosowania dodatkowych elementów (rozbudowa struktury przekształtnika). W przypadku jeżeli zapad napięcia będzie miał wartość większą niż 50% można przewidzieć pobór energii z zewnętrznego źródła np. z baterii akumulatorów.

¹⁹ Alternatywnym rozwiązaniem jest aktywny prostownik wejściowy, w przypadku którego stabilizator dostarcza jedynie tę część energii którą nie może być dostarczona do inwertora przez prostownik główny.



Rys. 14 Cykl pracy stabilizatora: (a) tranzystor w stanie przewodzenia, dioda w stanie blokowania; (b) tranzystor w stanie nieprzewodzenia, dioda w stanie przewodzenia; (c) sekwencja pracy stabilizatora podczas zapadu napięcia

W układach jak na rysunkach 15-17 zastosowano dodatkowy sposób zwiększający odporność napędu na przerwy w zasilaniu.



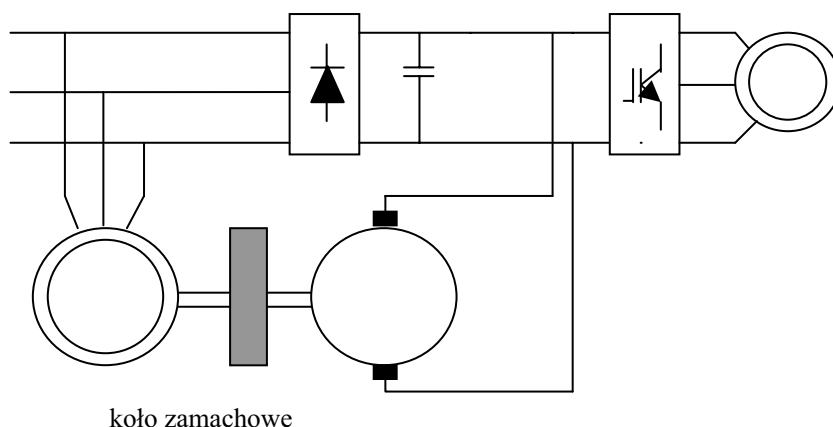
Rys. 15 Układ podtrzymania napięcia w obwodzie pośredniczącym wykorzystujący zewnętrzne źródło energii

Gwarantuje to rezerwowe zasilanie w okresach wystąpienia zaburzenia, podobnie jak w przypadku baterii kondensatorów, lecz współczynnik: energia na jednostkę objętości jest w tym przypadku dużo większy niż standardowych kondensatorów. Takie rozwiązanie ma wiele

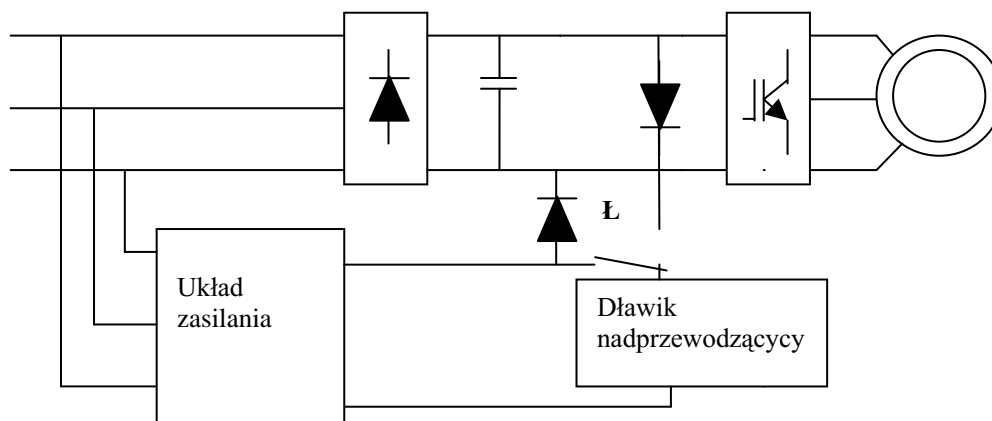
ograniczeń wynikających głównie z ograniczeń technicznych zewnętrznego źródła energii jakim jest np. bateria akumulatorów. Są to:

- ograniczona dopuszczalna liczba procesów ładowania i rozładowania baterii,
- ograniczony poziom rozładowania baterii, determinujący dopuszczalny poziom zaburzenia oraz czas jego wystąpienia,
- trudności eksploatacji baterii, wymagana przestrzeń, stopień ochrony itp.

Na rysunku 16 przedstawiono przykładowy układ z wykorzystaniem zespołu silnik-generator (dc) i koła zamachowego. Zewnętrznym źródłem energii może być też nadprzewodząca cewka (SMES) w układzie jak na rysunku 17. Uwzględniając, że SMES jest raczej źródłem prądu stałego, może być podłączony, zgodnie ze schematem ideowym jak na rysunku 17, bezpośrednio do szyn dc . Podczas wystąpienia zaburzenia łącznik \mathcal{L} otwiera się wymuszając przepływ prądu w obwodzie baterii kondensatorów w celu podtrzymania wartości napięcia dc .



Rys. 16 Zastosowanie zespołu silnik-generator oraz koła zamachowego do zwiększenia odporności napędu



Rys. 17 Zastosowanie SMES do zwiększenia odporności napędu

W wielu przypadkach napędy są przyłączone do wspólnych szyn jak na rysunku 11. Wówczas przedstawione powyżej układy stabilizatorów realizują stabilizację napięcia stałego dla grupy napędów.

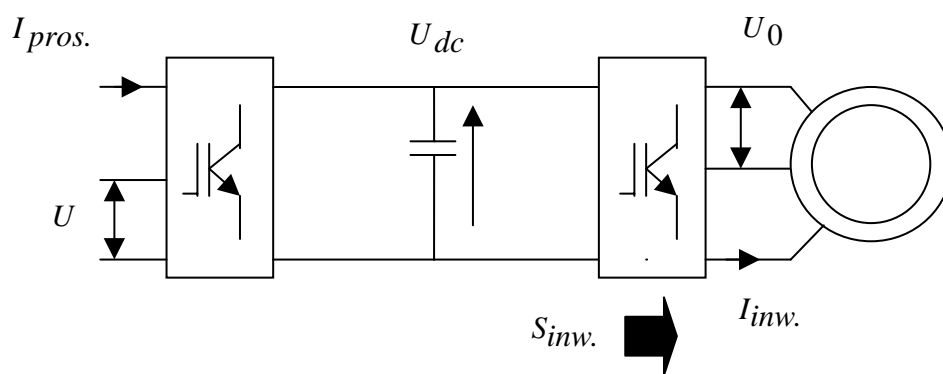
inteligentny energetyczny interface wejściowy

Oferowany wg (Jouanne 1999) przez wielu producentów w przedziale mocy do 500kW. W rozwiązaniu tym mostek diodowy jest zastąpiony przez aktywny prostownik jak na rysunku 18. Rozwiązanie to staje się coraz powszechniejsze ponieważ coraz więcej napędów wymaga dwukierunkowego przepływu energii (hamowanie odzyskowe) oraz kształtowania przebiegu

czasowego prądów wejściowych układu energoelektronicznego. Wówczas funkcja odporności na zapady jest dodatkową opcją sterowania wymuszającą przewymiarowanie prostownika. Ta cecha może być i często już jest, dodatkowym elementem promocji rynkowej napędu.

Amplituda zapadów na które odporny jest napęd ograniczona jest wymiarem prądowym prostownika. W układzie tym nie jest natomiast ograniczony czas trwania zaburzenia. Poprzez przyjęty stopień przewymiarowania prądowego prostownika można kształtować odporność napędu na zapady o różnej amplitudzie. Ponieważ wymiar termiczny tranzystorów umożliwia ich krótkotrwałe przeciążenia, istnieje możliwość kompensacji zapadów o krótkim czasie trwania lecz o dużej amplitudzie.

Funkcją prostownika jest dostarczenie wyłącznie mocy czynnej, dlatego pracuje on coraz częściej z jednostkowym współczynnikiem mocy. W takim przypadku, dla typowej pracy silnika z indukcyjnym współczynnikiem mocy, prostownik przewodzi mniej prądu niż inwerter. Dla tak samo zwymiarowanych: prostownika i inwertera oznacza to, że pewien procent prądowych możliwości prostownika można wykorzystać dla zwiększenia odporności napędu na zapady napięcia.



Rys. 18 Napęd prądu przemiennego ze sterowanym przekształtnikiem wejściowym

Podczas zapadu, napięcie stałe w obwodzie pośredniczącym maleje ze względu na brak równowagi energetycznej pomiędzy prostownikiem i inwerterem, co wiąże się z pobraniem energii z kondensatora. W celu regulacji napięcia stałego dc podczas zapadu, niezbędne jest zagwarantowanie, że taka sama moc czynna jest pobierana przez prostownik podczas zapadu jak i przed zapadem tzn.:

$$\sqrt{3}UI_{prost.} = \sqrt{3}U(1 - \Delta U_0)I_{prost.zap.}$$

- U - skuteczna wartość napięcia międzyfazowego
- $I_{prost.}$ - skuteczna wartość prądu wejściowego prostownika przed wystąpieniem zapadu,
- $I_{prost.zap.}$ - skuteczna wartość prądu wejściowego prostownika w czasie trwania zapadu (przy założeniu jednostkowego współczynnika przesunięcia),
- ΔU_0 - amplituda zapadu.

Oznacza to wzrost prądu wejściowego prostownika, miarą którego jest współczynnik K :

$$K = \frac{I_{prost.zap.}}{I_{prost.}} = \frac{1}{1 - \Delta U_0}$$

Maksymalna amplituda zapadu na który odporny jest napęd, jest więc zależna od wymiaru prądowego prostownika i warunków pracy silnika. W celu ilościowego oszacowania można założyć, że wymiar prądowy inwertora i prostownika jest taki sam.

Jeżeli inwertor jest wymiarowany na maksymalną wartość napięcie $dc - U_{dc}$, a wymiar prądowy jest determinowany najbardziej niekorzystnym przypadkiem występującym przy dostarczaniu znamionowej mocy pozornej inwertora - $S_{inw.N}$ przy minimalnej wartości składowej podstawowej napięcia wyjściowego (międzyfazowego) - $U_{0,min}$ tzn.:

$$I_{inw.N} = \sqrt{2} \frac{S_{inw.N}}{\sqrt{3}U_{0,min}}$$

$I_{inw.N}$ oznacza amplitudę wyjściowego, znamionowego prądu inwertora. Zakładając taki sam wymiar prądowy prostownika jest to również jego maksymalna wartość prądu. Ponieważ prostownik pracuje z jednostkowym współczynnikiem przesunięcia (DPF), dostarcza on do odbiornika tylko moc czynną. Uwzględniając powyższe zależności, skuteczna wartość prądu wyjściowego prostownika jest ograniczona do poziomu określonego zależnością:

$$I_{prost.zap.} = \frac{S_{inw.} \cdot DPF_{sil.}}{\sqrt{3}U_N (1 - \Delta U_0) \eta_{inw.} \eta_{prost.}} \leq \frac{S_{inw.N}}{\sqrt{3}U_{0,N}}$$

gdzie $DPF_{sil.}$ jest współczynnikiem przesunięcia silnika indukcyjnego. W efekcie wartość maksymalnej amplitudy zapadu napięcia która może być kompensowana, można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta U_0 \leq 1 - \frac{DPF \cdot S_{inw.} \cdot U_{0,min.}}{S_{inw.N} U_N \eta_{inw.} \eta_{prost.}}$$

Przykładowo, jeżeli silnik indukcyjny jest obciążony w 90%, jego współczynnik przesunięcia wynosi 0,9, sprawności inwertora i prostownika są takie same i wynoszą 95% oraz $U_{0,min} = 0,9U_N$, napęd jest odporny na zapad napięcia o dowolnym czasie trwania i amplitudzie do 19%²⁰. Większą, dopuszczalną wartość zapadu można uzyskać zwiększając wymiar prądowy prostownika. Wartość zapadu ΔU_x otrzymana poprzez zwiększenie wymiaru prostownika zależy od współczynnika K_x przez który zwiększono wymiar prostownika oraz od wartości załamania ΔU_0 na którą napęd był pierwotnie zaprojektowany tzn.:

$$\Delta U_x = 1 - \frac{1 - \Delta U_0}{K_x}$$

Rozumowanie to może być również zastosowane do układu z równoległym przekształtnikiem podwyższającym napięcie (rys. 13) jak również do układu z wieloma inwertorami zasilanymi ze wspólnych szyn napięcia stałego dc (rys. 11).

Zaletami rozwiązania są:

- jednostkowy wejściowy współczynnik przesunięcia,
- redukcja odkształcenia prądów wejściowych przemiennika,

²⁰ Wg [Jouanne 1999] 1,5-krotne przewymiarowanie prostownika gwarantuje odporność napędu na zapady napięcia o amplitudzie do 40%.

- samoregulacja napięcia stałego *dc* podczas zapadów uzyskana w efekcie aktywnej pracy przekształtnika wejściowego,
- dwukierunkowy przepływ mocy.

Wadami rozwiązania są:

- większe gabaryty związane z obecnością dławików filtrów wejściowych których instalacja jest niezbędna ze względu na pracę aktywnego prostownika,
- wzrost zaburzeń wysokiej częstotliwości (zarówno symetrycznych jak i nie symetrycznych) oraz zaburzeń EMI,
- znacznie większa cena²¹.

6. 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, w tym szczególnie napędów elektrycznych i innych układów energoelektronicznych staje się jednym z problemów o kapitalnym znaczeniu zarówno technicznym jak i ekonomicznym. Konsekwencją rozpoznania odporności odbiornika jest rozwój metod jej poprawy, zarówno poprzez urządzenia zewnętrzne w stosunku do napędu jak i zmiany jego konstrukcji i zasad sterowania. Wydaje się, że w większości oferowanych obecnie na rynku napędów nie stosuje się szczególnych strategii sterowania w przypadku wystąpienia zaburzenia. Wyjątkiem jest zatrzymanie napędu w przypadku gdy zapad napięcia przekroczy zadaną wartość graniczną. W tym celu stosowana jest kontrola napięcia *dc* i napęd jest wyłączany niezależnie od tego jaki rodzaj zaburzenia wystąpił (zapad czy przerwa w zasilaniu). Ten stan winien ulec zmianie. Użytkownik powinien uzyskać możliwość zakupu napędu o poziomie odporności właściwym dla środowiska elektromagnetycznego w którym napęd ma być zainstalowany.

²¹ Dodatkowe informacje: <http://www.baldor.com>

LITERATURA

1. *A guide to monitoring distribution power quality*. EPRI TR-103208
2. Amantegui J., Zabala L., Ruiz S., Vargas G., Soto F., Prat X., Barba R.: *Characterisation of voltage dips in electrical networks and their impact on customer installations*. CIGRE Session 1998, 36-104
1. Bollen M.H.J.: *The influence of motor re-acceleration on voltage sags*. IEEE Trans.on Ind. Appl. 1995, 31, 4, pp. 667-674
2. Bollen M.H.J.: *Characterization of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives*. IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 12, Oct. 1997, pp. 1666-1671
3. Caldon R., Fauri M., Balbo N.: *Evaluation of damages due to voltage dips on devices and industrial plants*. 3rd Inter. Conf. on Power Quality: End-Use Applications and Perspectives, October 24-27, 1994, Amsterdam
4. David A., Lajoie-Mazenc E., Sol C.: *Maintaining the synchronism of an ac adjustable speed drive during short supply interruption for an optimal and automatic soft restart*. IEEE ISIE'93, Budapest, Hungary, June 1-3, 1993
5. David A., Lajoie-Mazenc E., Sol C.: *Ride-through capability of ac adjustable speed drives in regards to voltage dips on the distribution network*. EPE'93, Brighton, UK, September 13-16, 1993
6. David A., Maire J., Dessoude M.: *Influence of voltage dips and sags characteristics on electrical machines and drives: evaluation and perspective*. 3rd Inter. Conf. on Power Quality: End-Use Applications and Perspectives, October 24-27, 1994, Amsterdam
7. Dugan R. C., McGranaghan M.F., Wayne Beaty H.: *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill, 1996
8. Epperely R.A., Hoadley F.L., Piefer R.W.: *Considerations when applying ASD;s in continuous processes*. IEEE Trans. Ind. Appl., 1997, 33, pp. 389-396
9. *Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 2: Voltage dips and short interruptions*. First UIE Edition-1996 ISBN 2-9507878-2-7
10. Hanzelka Z.: *Sposoby zwiększenia odporności regulowanych napędów elektrycznych na załamania napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu*. Inter. Workshop on EMC Standardization and Improvement in Power Electronics. Zielona Góra 1999
11. Hanzelka Z.: *Wpływ załamań napięcia i krótkich przerw w zasilaniu na pracę napędów elektrycznych o regulowanej prędkości*. Gliwice 1999
12. IEC 61000-4-11: 1994 *Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests*.
13. IEEE Std. 1159-1995, *Recommended practice on monitoring electric power quality*. Working Group on Monitoring Electrical Power Quality of SCC22 – Power Quality, Draft 6, Nov. 1994
14. Lamoree J., Tang L., DeWinkel C., Knudtson G. etc.: *Performance improvements of a Micro-SMES used to provide „ride-through” for large critical industrial loads*. 3rd Inter. Conf. on Power Quality: End-Use Applications and Perspectives, October 24-27, 1994, Amsterdam
15. Langley R., Mansoor A., Collins E.R., Morgan R.L.: *Voltage sag ride-through testing of adjustable speed drives using a controllable dynamic dynamometer*. 8th Inter. Conf. on Harmonics and Quality of Power, October 14-16 1998, Athens, Greece
16. Langley R., Mansoor A.: *What causes ASDs to trip during voltage sags? – part 1*. Power Quality Assurance, Sep. 1999, 12-15
17. Managuli R., Baghzouz Y.: *Voltage dip control during motor starting by shunt capacitors*. Proceedings of the ICHQP 7th International conf. On Harmonics and Quality of Power. October 16-18, 1996 Las Vegas, Nevada, USA
18. Mansoor A., Collins E. R., Bollen M. H. J., Lahaie S.: *Behaviour of adjustable-speed drives during phase angle jumps and unbalanced sags*. Stockholm Power Tech. Conf., Stocholm, Sweden, June 18-22, 1995
19. Mansoor A., Collins E. R., Morgan R.L.: *Effects of unsymmetrical voltage sags on adjustable speed drives*. Proceedings of the ICHQP 7th International conf. On Harmonics and Quality of Power. October 16-18, 1996 Las Vegas, Nevada, USA
20. McGranaghan M.F.: *Effects of voltage sags in process industry applications*. Stockholm Power Tech. Conf., Stocholm, Sweden, June 18-22, 1995
21. McGranaghan M.F.: *Helping motors ride through voltage sags*. Power Quality Assurance, May/June 1999
22. Melhorn C., Timothy D.D., Beam G.E.: *Voltage sags: their impact on the utility and industrial customers*. IEEE Trans. on Ind. Appl. 1998, 34, 3, 549-558
23. Sarmienko H.G., Estrada E.: *A voltage sag study in an industry with adjustable speed drives*. IEEE Ind. Appl. Mag., 1996, 2, 16-19
24. Stielau O.H.: *The effect of voltage dips on industrial equipment*. 3rd Inter. Conf. on Power Quality: End-Use Applications and Perspectives, October 24-27, 1994, Amsterdam

25. Strangas E. G., Wagner V.E., Unruh T.D.: *Variable speed drives evaluation test*. IEEE Ind. Appl. Mag. vol. 4, no. 1, Jan./Feb. 1998, 53-57
26. Sudria A., Pedra J., Bergas J., Prat X.: *Computer assisted study of the consequences of voltage dips on sensitive loads*. PQA'97, June 15-18, 1997, Stockholm, Sweden
27. Turner A.E., Collins E.R.: *The performance of ac contactors during voltage sags*. Proceedings of the ICHQP 7th International conf. On Harmonics and Quality of Power. October 16-18, 1996 Las Vegas, Nevada, USA
28. 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
29. van Zyl A., Spee R.: *Ride-through and energy storage options for ASDs*. Power Quality Assurance, Sep. 1999
30. 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
31. Yalcinkaya G., Bollen M.H.J., Crossley P.A.: *Influence of induction motor load on imbalanced sags*. PQA'97