

Wpływ zapadów napięcia wywołanych zwarciami w sieci dystrybucyjnej na pracę odbiorów przemysłowych. Wybrane zagadnienia

Streszczenie. Zapady napięcia występujące w sieci dystrybucyjnej są niekorzystnymi zjawiskami, które mogą w istotny sposób wpływać na pracę odbiorów prowadząc niejednokrotnie do ich nagłego wyłączenia. Jeśli tego typu wyłączenia mają miejsce w procesach technologicznych wymagających zachowania ciągłości produkcji, to często towarzyszą im duże straty finansowe. W związku z tym zasadniczym celem niniejszego artykułu jest przedstawienie problematyki zapadów napięć występujących w sieciach dystrybucyjnych oraz ich wpływu na pracę odbiorników przemysłowych.

Abstract. Voltage dips occurring in the distribution network are adverse phenomena, which can have a significant impact on the loads operation often leading to their sudden shutdown. If disconnections of loads occur in processes that require continuity of production they are often accompanied by large financial losses. Therefore, the primary objective of this paper is to present the issues of voltage dips occurring in distribution networks and their impacts on the industrial loads operation. (Impact of the voltage dips caused by faults in distribution network on the industrial loads operation. Selected issues).

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, zapady napięcia, linie produkcyjne, regulowane napędy prądu stałego.

Keywords: electric power quality, voltage dips, production lines, regulated DC drivers.

doi:10.12915/pe.2014.07.28

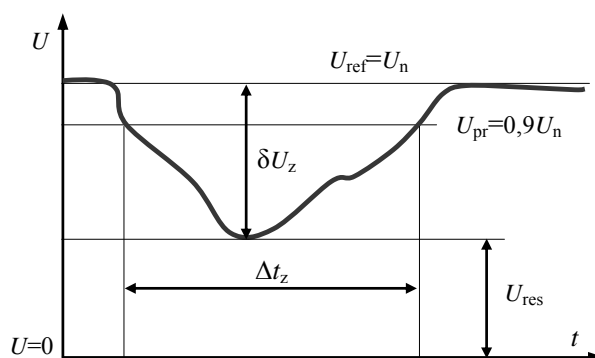
Wstęp

Istotę problemu jakości zasilania energią elektryczną podkreśla fakt, że zła jakość energii (rozumiana przede wszystkim jako jakość napięcia) powoduje w światowej gospodarce dodatkowe koszty szacowane na kilkaset miliardów euro rocznie. Do najczęściej występujących zaburzeń elektromagnetycznych w sieci, stanowiących największy problem jakości zasilania, należą zapady napięcia rozumiane jako obniżenie jego wartości skutecznej do przedziału $90\% \pm 1\%$ wartości znamionowej [3]. Na skutek zapadu niektóre urządzenia przestają prawidłowo działać nawet, jeżeli czas trwania zapadu jest bardzo krótki (znacznie poniżej 1 s). Rosnąca liczba takich urządzeń, wrażliwych na krótkotrwałe zmiany wartości napięcia (np. sprzęt elektroniczny i regulowane napędy), powoduje coraz większe zainteresowanie przyczynami, skutkami oraz prewencją zapadów napięcia. Jakość napięcia oczekiwana przez odbiorców nie ogranicza się tylko do kwestii ciągłości zasilania w skali dni, godzin czy minut, lecz coraz częściej w skali sekund, a nawet milisekund. Może się wydawać, że zapady napięcia nie są tak szkodliwe jak przerwy w zasilaniu. Okazuje się jednak, że niekontrolowane przerywanie procesu produkcyjnego na skutek kilku krótkotrwałych zapadów może skutkować znacznie większymi stratami ekonomicznymi niż w przypadku pojedynczej, nawet stosunkowo długiej, przerwy w zasilaniu.

Zapad napięcia i jego podstawowe parametry

Według normy [3] zapad napięcia można scharakteryzować przez określenie dwóch parametrów: najmniejszy poziom napięcia podczas zapadu (U_{res}) oraz czas jego trwania (Δt_z). Taka charakterystyka jest wystarczająca dla zapadu o quasi-prostokątnym kształcie przebiegu wartości skutecznej, jednak w celu dokładniejszego opisu tego zjawiska stosowane są także inne wskaźniki (rys. 1). Podstawową wielkością pozwalającą na określenie cech zapadu jest tzw. napięcie referencyjne (U_{ref}). Jest to wartość napięcia, w stosunku do której podawane są (w jednostkach względnych lub procentach) amplitudy, progi i inne wielkości charakteryzujące zapad napięcia. Zwykle, jako napięcie referencyjne przyjmowana jest wartość napięcia deklarowanego U_d , która w

normalnych warunkach pracy sieci równa jest napięciu znamionowemu U_n .



Rys.1. Przykładowy przebieg napięcia (wartość skuteczna) podczas zapadu oraz jego podstawowe parametry

Najczęściej stosuje się do opisu zapadu takie wielkości, jak: wielkość zapadu (preferowana przez IEC jako *voltage dip*), względna głębokość zapadu (określana, głównie w literaturze amerykańskiej, jako *voltage sag*), a także strata napięcia wyznaczana ze wzoru (1) i energia zapadu wyznaczana ze wzoru (2), która reprezentuje energię niedostarczoną do odbiorcy w wyniku zapadu napięcia.

$$(1) \quad L_v = \int_0^t \left(1 - \frac{U(t)}{U_{ref}} \right) dt,$$

$$(2) \quad E_{vs} = \int_0^t \left\{ 1 - \left(\frac{U(t)}{U_{ref}} \right)^2 \right\} dt,$$

gdzie: $U(t)$ - jest przebiegiem wartości skutecznej napięcia w czasie zapadu.

W praktycznych rozważaniach dotyczących zapadów wielofazowych, zapad jest zazwyczaj traktowany, jako pojedyncze zaburzenie. Amplituda zapadu o złożonym kształcie jest najczęściej przyjmowana, jako największa zmiana napięcia, a czas trwania jest czasem trwania całego zaburzenia, podczas którego wartość napięcia jest mniejsza niż przyjęta wartość progowa. Taka forma opisu zapadów

napięcia stanowi duże uproszczenie, gdyż nie uwzględnia asymetrii napięć czy też występującej podczas zapadu zmiany kątów fazowych.

Zgodnie z normą PN-EN 50160 w sieciach nn i SN (do 36 kV), dla których norma definiuje parametry napięcia zasilającego i dopuszczalne odchylenia w normalnych warunkach, odbiorcy mogą się spodziewać w ciągu roku od kilkudziesięciu do jednego tysiąca zapadów. Amplituda większości z nich nie powinna przekraczać 60% napięcia deklarowanego (napięcie resztkowe ponad 40%), z tym, że nie wyklucza się występowania większej głębokości zapadu oraz dodaje się, że na pewnych obszarach bardzo często mogą występować zapady o głębokości $10\% \div 15\% U_d$. Czas trwania takiego zapadu zwykle nie przekracza 1 sekundy. W normie nie podano dopuszczalnej liczby tych zdarzeń, gdyż są one nieprzewidywalne i mają charakter losowy, a zmiany napięcia, które nie powodują obniżenia jego wartości poniżej 90% napięcia deklarowanego, nie są uważane za zapady. W załączniku do normy [3] zwraca się także uwagę na kryteria zachowania odbiorów podczas zapadów napięcia oraz na konieczność zapewnienia ich właściwej odporności na zaburzenia występujące w sieci zasilającej i towarzyszące im zmiany napięcia.

Przyczyny i skutki zapadów napięć

Sieć elektroenergetyczna wraz ze źródłami i odbiorami do niej przyłączonymi stanowi zintegrowany system elektroenergetyczny. Każda duża zmiana napięcia lub prądu wywołuje istotne zmiany wielkości elektrycznych w poszczególnych punktach systemu. W związku z tym zapady napięcia mają charakter obszarowy i są efektem nagłych zmian wielkości elektrycznych w „odległych” punktach SEE.

Podstawową przyczyną występowania zapadów napięcia są przetężenia prądowe powstałe: w wyniku zwarcia, podczas rozruchu dużych napędów lub włączenia odbiorników dużej mocy. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje zapadów napięć: zwarciovne zapady napięcia i łączeniowe zapady napięcia. Zwarciovne zapady napięcia zwykle posiadają znacznie większe głębokości niż łączeniowe zapady. Prąd płynący podczas zwarcia jest często kilka (a nawet kilkadziesiąt) razy większy niż prąd dopuszczalny długotrwałe, co powoduje duże spadki napięć na impedancjach poszczególnych elementów systemu. W konsekwencji dochodzi do znacznego obniżenia napięcia w poszczególnych obszarach sieci. Poziom występującego zapadu napięcia silnie zależy od: położenia danego punktu systemu względem miejsca, w którym nastąpiło zwarcie, rodzaju zwarcia, a także od lokalizacji i mocy źródeł wytwórczych. Ponadto w przypadku asymetrycznych zakłóceń zwarciovnych parametry zapadu zależą dodatkowo od układu połączeń uzwojeń transformatorów znajdujących się pomiędzy miejscem zwarcia i danym punktem w sieci.

Zapadów napięcia w sieci praktycznie nie można wyeliminować. Dotyczy to głównie zwarciovnych zapadów napięć, gdyż występowanie zwarcia w sieciach jest praktycznie nieuniknione. Należy jednak dążyć do redukcji ich liczby i czasu trwania. Ograniczenie liczby zwarcia, a tym samym zmniejszenie liczby zapadów napięcia, można uzyskać m.in. przez: zastępowanie linii napowietrznych liniami kablowymi lub stosowanie odgromników. Natomiast ograniczenie czasu trwania zapadu napięcia należy poszukiwać w nastawieniach zastosowanych układów automatyki zabezpieczeniowej.

Skutki powodowane przez zapady napięcia zależą bardzo silnie od cech charakterystycznych danego zapadu (m.in. czas trwania, amplituda zapadu) oraz rodzaju i typu odbiorników. Wrażliwość odbiorników na występujące zapady (chwilowe zaniki napięcia) jest bardzo

zróżnicowana. Podczas zapadu napięcia do urządzenia nie jest dostarczana wystarczająca ilość energii niezbędnej do jego prawidłowego funkcjonowania. Odbiornik wówczas może pracować niewłaściwie lub zostać całkowicie odłączony przez układy zabezpieczające.

Z reguły bardzo negatywne skutki ma wpływ zapadów napięcia na odbiorców przemysłowych, gdy realizowane u nich procesy technologiczne wykonywane są na liniach produkcyjnych wymagających zapewnienia ciągłości zasilania. W zależności od indywidualnych cech linii produkcyjnych zapady napięcia mogą powodować krótkie lub długie przerwy w produkcji. Nagłe wyłączenia linii produkcyjnych mogą prowadzić do: zniszczenia materiału obrabianego, długotrwałego ponownego uruchomienia procesu technologicznego, obniżenia jakości produktu, a nawet do uszkodzenia tych linii i zagrożenia bezpieczeństwa personelu obsługi tych linii. Może to generować znaczące straty ekonomiczne, które w warunkach gospodarki rynkowej są nieakceptowane.

Wpływ zapadów napięcia na pracę linii produkcyjnych

Linie produkcyjne w zakładach przemysłowych cechują się znaczącą liczbą urządzeń, niejednokrotnie o dużej mocy, pracujących w trybie ciągłym w sposób ściśle skoordynowany między sobą. Należy podkreślić, że awaryjnemu wyłączeniu jednego elementu linii produkcyjnej towarzyszy zwykle nagłe wyłączenie całej linii. W związku z tym wpływ zapadów napięcia na pracę linii produkcyjnych zależy bezpośrednio od odporności najsłabszego „ogniwa” na nagłe obniżenia i powroty napięć zasilających do wartości bliskiej znamionowej. Z doświadczeń eksploatacyjnych wynika, że w wielu przypadkach tym najsłabszym ogniwem są napędy lub układy sterowania. Obecnie niekorzystny wpływ zapadów napięć na elektroniczne układy sterowania można stosunkowo łatwo zminimalizować zasilając te układy z dedykowanej instalacji zasilania gwarantowanego wykorzystujących bezprzerwowo zasilacze UPS. Niestety w wielu przypadkach nie można tego rozwiązania zastosować do napędów, które ze względu na znaczne moce jednostkowe czynią wszelkie sposoby redukcji skutków analizowanego zaburzenia problemem trudnym technicznie i bardzo kosztownym.

Wpływ zapadów napięcia na pracę napędów może być bardzo niekorzystny. Regulowane napędy prądu stałego, a także przemiennego, będące elementami składowymi linii produkcyjnych, reagują w różny sposób na zapady napięcia. Układy te poza konstrukcją silników różnią się bowiem topologią części energoelektronicznej i układami sterowania (zarówno oprogramowaniem jak i hardwarem).

Można wyróżnić cztery główne przyczyny, które sprawiają, że napędy wykazują dużą wrażliwość na rozważany rodzaj zaburzeń. Pierwsza to zasilanie układu sterowania napędu. Jeżeli jego zasilacze nie są w stanie zapewnić wystarczającego poziomu napięcia (we wszystkich stanach pracy), wówczas napęd podczas zapadów musi być wyłączony ze względu na groźbę utraty kontroli nad jego pracą. Zatem pierwsze działania naprawcze powinny dotyczyć podtrzymania zasilania układu pomiarowo-sterującego. Druga grupa problemów dotyczy możliwych nieprawidłowości w pracy lub nawet groźby wystąpienia stanu awaryjnego w części energoelektronicznej układu w następstwie zaburzenia. Trzecią przyczyną jest zachowanie się silników, które podczas zapadów mogą generować duże prądy udarowe oraz istotne zmiany momentu i prędkości obrotowej. Czwarta przyczyna jest związana z reżimami pracy procesu technologicznego realizowanego na linii produkcyjnej. W wielu przypadkach, ze względów technologicznych, nie toleruje się utraty precyzyjnej kontroli prędkości i momentu

napędu, nawet przez bardzo krótki czas, na co mogą istotnie wpływać występujące zapady napięcia.

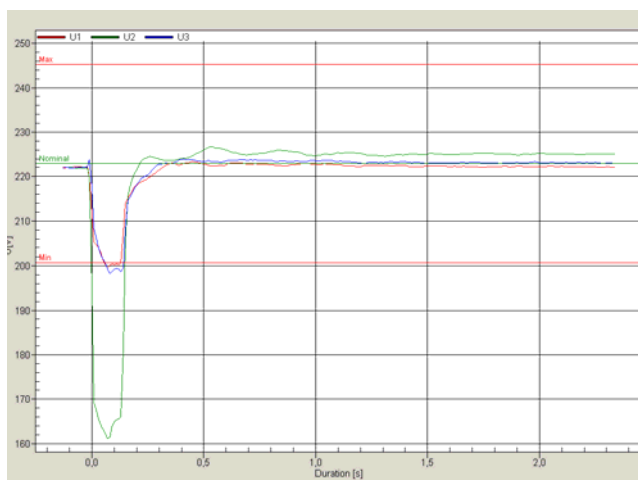
Należy podkreślić, że reakcja napędu na zapady napięcia, jest zarówno funkcją wielkości opisujących zaburzenie jak również rodzaju obciążenia napędu i zachowania się tego obciążenia w stanach dynamicznych.

Reasumując, można stwierdzić, że wpływ zapadów napięcia na pracę napędów linii produkcyjnej zależy od szeregu czynników i nie można, bez przeprowadzenia szczegółowych analiz, jednoznacznie określić przyczyn wyłączeń następujących w konsekwencji zapadu napięcia.

Diagnoza wyłączeń linii produkcyjnych u przykładowego odbiorcy

Rozpatrywany przypadek dotyczy wyłączeń linii produkcyjnych u pewnego odbiorcy (działającego w branży stalowej), zasilanego bezpośrednio z sieci WN. Z informacji przekazanych przez odbiorcę wynika, że do wyłączeń linii dochodzi na skutek złej jakości energii elektrycznej dostarczanej do zakładu z sieci dystrybucyjnej. Z uwagi na realizowany proces technologiczny analizowane linie produkcyjne wymagają zachowania ciągłości zasilania, dlatego nagłe ich wyłączenia prowadzą do trwałego przestoju w pracy, a nawet niejednokrotnie do uszkodzeń poszczególnych elementów tych linii.

Przeprowadzone analizy zarejestrowanych zapadów napięć oraz informacji przekazanych przez odbiorcę oraz właściwego operatora systemu dystrybucyjnego wskazują, że przyczyną wyłączeń są zapady napięcia, które powstają na skutek zakłóceń zwarciovych występujących w sieci zasilającej WN. Należy podkreślić, że do wyłączeń linii produkcyjnych dochodzi m.in. na skutek wystąpienia jednofazowych zakłóceń zwarciovych eliminowanych w prawidłowy sposób w strefie podstawowej (bezwłocznej) zabezpieczeń odległościowych. Czas eliminacji zakłócenia nie przekraczał dopuszczalnego czasu trwania zwarcia, wynoszącego dla sieci WN 150 ms [4]. Ponadto stwierdzono, że wyłączenia linii produkcyjnych występują nawet podczas zapadów napięcia o niewielkiej głębokości, wywołanych odległymi zwarciami. Głębokości zapadu powodującego wyłączenia linii produkcyjnych mieściły się w przedziale od 70% do 89%, a czas ich trwania zwykle nie przekraczał 150 ms (rys.2). Przedstawione informacje są dosyć niepokojące, ponieważ wskazują, że zakłócenia zwarciovowe, występujące praktycznie w całej sieci WN, z której zasilany jest przedmiotowy odbiorca, mogą skutkować wyłączeniami analizowanych linii produkcyjnych.



Rys.2. Zarejestrowane przebiegi wartości skutecznych napięć fazowych (na sznycach nN zasilających linię produkcyjną) dla zapadu powodującego wyłączenie napędu prądu stałego

Z przeprowadzonego rozpoznania sytuacji wynika, że obiektami bezpośrednio generującymi wyłączenia linii produkcyjnych podczas zapadów napięcia są regulowane napędy prądu stałego o mocy od kilkudziesięciu do 100 kW. Podczas zapadów napięcia dochodzi do zadziałania zabezpieczeń nadprądowych tych napędów, a w niektórych przypadkach występują nawet uszkodzenia tyrystorów mocy pracujących w układzie energoelektronicznym rozpatrywanych napędów.

Przeprowadzona analiza literaturowa pokazała, że regulowane napędy prądu stałego należą do grupy urządzeń szczególnie wrażliwych na występujące zapady napięcia. Według informacji zawartych np. w [2] tzw. regulowane układy tyrystorowe wykorzystywane w układach napędowych z silnikami prądu stałego są w większości przypadków czułe na zapady o czasie trwania dłuższym od kilku milisekund i amplitudzie większej niż 15%.

Wpływ zapadów napięcia na regulowane napędy prądu stałego może być bardzo zróżnicowany. Ich reakcją jest przede wszystkim uwarunkowana parametrami zapadu napięcia (głębokością, czasem trwania, asymetrią napięć, zmianą kątów fazowych oraz odkształceniem napięć) oraz zastosowanym rodzajem i parametrami silnika prądu stałego i jego obciążeniem.

Z punktu widzenia konstrukcji silnika można stwierdzić, że silniki prądu stałego są bardziej wrażliwe na zapady napięcia niż silniki prądu przemiennego. Wyniki badań symulacyjnych w tym zakresie przedstawiono w następnym punkcie. W silniku prądu stałego zapad napięcia powoduje chwilowe zmniejszenie strumienia wzbudzenia, a ponieważ stała czasowa uzwojenia wzbudzenia jest duża, przywrócenie napięcia po zapadzie powoduje przepływ dużych prądów w obwodzie twornika i skokową zmianę momentu oraz prędkości. Należy zaznaczyć, że reakcja regulowanego napędu prądu stałego na zapady napięcia bardzo silnie zależy od właściwości zastosowanego modułu energoelektronicznego i układu sterowania [2].

Podczas symetrycznych zapadów napięcia pętla sprzężenia zwrotnego regulatora/sterownika napędu prądu stałego dąży do podtrzymania stałej wartości napięcia wyjściowego lub stałego momentu napędowego przez zwiększenie kąta przewodzenia tyrystorów. Podczas zapadów, w szczególności głębokich, napięcie to maleje, zmniejszając w konsekwencji moment napędowy i prędkość silnika. Nagłe odbudowanie napięcia zasilającego (na skutek eliminacji zakłócenia), przy granicznych wartościach kątów wysterowania tyrystorów lub zakłóceniach synchronizacji z siecią zasilającą (układu regulacji) może prowadzić do przetężenia prądowego (zależnego m.in. od parametrów konstrukcyjnych silnika prądu stałego) powodującego zadziałanie układu zabezpieczającego napędu. Natomiast w przypadku wystąpienia niesymetrycznych zapadów napięcia, amplitudy napięcia zasilającego w poszczególnych fazach maleją w sposób niesymetryczny. Wówczas regulator/sterownik dążąc do utrzymania stałego momentu obciążenia może powodować wydłużenie czasu przewodzenia tyrystorów. Skutkuje to większym obciążeniem prądowym półprzewodników zasilanych z faz, których napięcia uległy zmianie w mniejszym stopniu. Taka sytuacja również może powodować wzrost wartości prądu twornika ponad wartość dopuszczalną i w konsekwencji wyłączenie napędu przez układ zabezpieczeniowy.

Dodatkową przyczyną wystąpienia przetężeń prądowych i zarazem zasadniczym problemem regulowanych przekształtników AC/DC jest synchronizacja ich układów regulacji z napięciem sieci. Układy te wymagają precyzyjnej detekcji przejścia napięć fazowych przez zero. Skokowa zmiana przesunięcia fazowego

towarzysząca zapadom napięcia, a występująca na skutek nagłej zmiany impedancji systemu zastępczego „widzianego” z zacisków napędu, powoduje zmianę odstępów pomiędzy punktami naturalnej komutacji i może prowadzić do błędnej detekcji punktu naturalnej komutacji, co w konsekwencji może powodować nieprawidłowe załączanie tyrystorów, a nawet wystąpienie przewrotu komutacyjnego w tzw. napędach nawrotnych [1].

Z przeprowadzonych analiz działania układów automatyki zabezpieczeniowej przedmiotowych napędów wynika, że bezpośrednią przyczyną niektórych wyłączeń linii produkcyjnych może być zbędne zadziałanie jednego z zabezpieczeń napędu mającego za zadanie m.in. ochronę linii produkcyjnej przed wystąpieniem nadmiernego napięcia w układzie mechanicznym tej linii (tzw. ochrona od skutków nadmiernego napięcia obrabianej blachy). Restrykcyjne nastawy tego zabezpieczenia oraz bezwzględny charakter działania (zabezpieczenie wyposażone jest w człon elektromagnetyczny) powodują, że zabezpieczenie to będzie reagować na udary/przetężenia prądowe niezależnie od źródła ich pochodzenia, np. wywołane zapadami napięcia, a nie zacięciem obrabianej blachy.

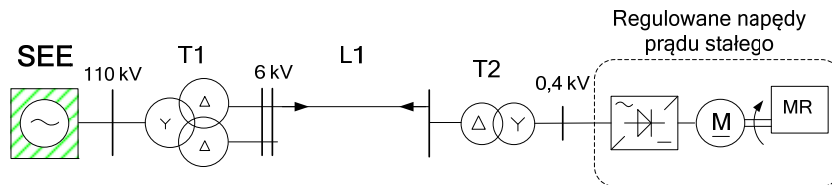
Ograniczony zakres lub nawet brak informacji na temat: dokładnego przebiegu wyłączeń linii produkcyjnych, zastosowanych trybów regulacji układów napędowych prądu stałego, algorytmów działania poszczególnych zabezpieczeń napędu oraz duża „losowość” występujących wyłączeń znacząco ogranicza możliwość wskazania tylko jednej, głównej przyczyny wyłączeń. Najprawdopodobniej do wyłączeń dochodzi na skutek kumulacji kilku z wymienionych wcześniej czynników.

Reasumując można stwierdzić, że metod minimalizacji wyłączeń regulowanych napędów prądu stałego należy poszukiwać w: minimalizacji liczby i głębokości występujących zapadów napięć, symetryzacji występujących zapadów napięć, a także w zwiększeniu odporności napędów i ich zabezpieczeń na wstępujące zapady.

Wyniki wybranych symulacji

W celu określenia przybliżonej wartości występujących przetężeń prądowych generowanych przez napędy prądu stałego pracujące u odbiorcy podczas zapadów napięcia przeprowadzono odpowiednie badania symulacyjne. Badania te przeprowadzono przy wykorzystaniu oprogramowania MATLAB Simulink, w którym stworzono model fragmentu układu zasilającego wraz z regulowanymi napędami prądu stałego. Stworzony model „odzworowywał” warunki pracy układu napędowego zainstalowanego u wybranego odbiorcy. Schemat ideowy zamodelowanego układu sieciowego przedstawiono na rysunku 3.

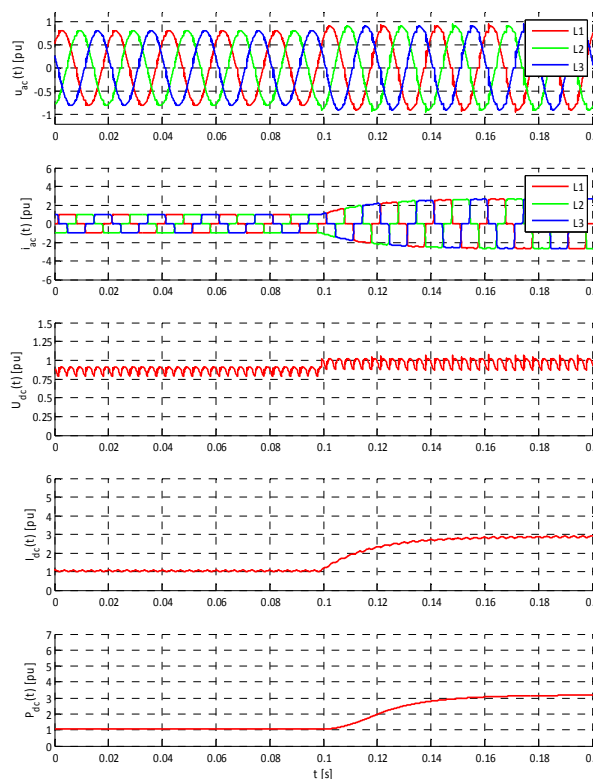
Wybrane, najbardziej charakterystyczne wyniki wykonanych symulacji przedstawiono na rysunkach 4 ÷ 6. Wielkości zamieszczone na tych rysunkach to: $u_{ac}(t)$ – wartość chwilowa napięcia mierzona na zaciskach napędu prądu stałego (po stronie zmiennoprądowej); $i_{ac}(t)$ – wartość chwilowa prądu mierzona na zaciskach napędu prądu stałego (po stronie zmiennoprądowej); $U_{dc}(t)$ – wartość chwilowa napięcia mierzona na zaciskach silnika prądu stałego; $I_{dc}(t)$ – wartość chwilowa prądu mierzona na zaciskach silnika prądu stałego; $P_{dc}(t)$ – wartość mocy czynnej pobieranej przez silnik; E_{wac} – wartość napięcia wzbudzenia silnika prądu stałego. W celu zwiększenia przejrzystości rysunków, wielkości na wykresach przedstawiono w jednostkach względnych.



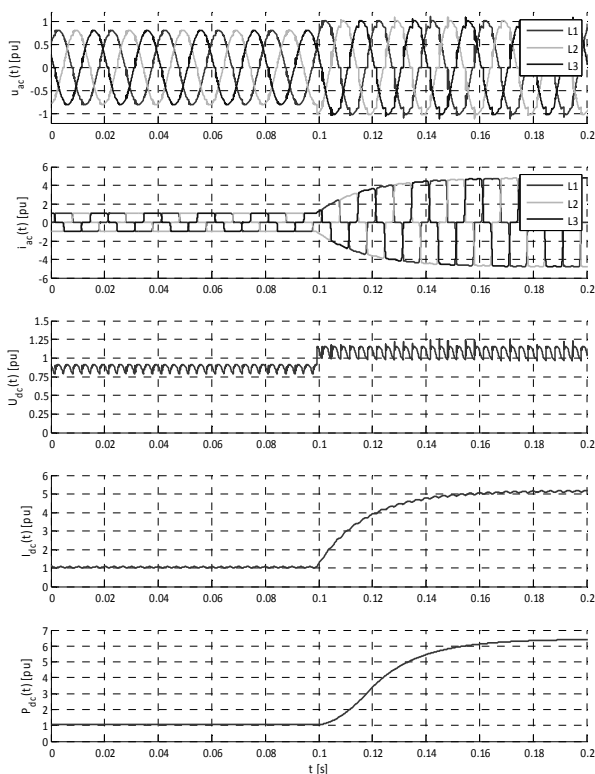
Rys.3. Schemat ideowy sposobu zasilania regulowanego napędu prądu stałego napędzającego linię produkcyjną

Zamieszczone na rysunku 4 oraz na rysunku 5 przebiegi przedstawiają wpływ powrotu napięcia zasilającego (do wartości roboczej) na badany napęd. Przedstawione przebiegi przeprowadzono dla quasi-ustalonego stanu początkowego występującego podczas zapadu napięcia o głębokości 20% – praca napędu prądu stałego jest stabilna z mocą bliską mocy znamionowej. Podkreśla się, że przedstawione przebiegi zostały wygenerowane przy założeniu, pracy układu tyrystorowego w trybie tzw. maksymalnego czasu przewodzenia oraz zasilania uzwojenie wzbudzenia analizowanego napędu prądu stałego z niezależnego źródła napięcia gwarantowanego (na które nie ma wpływu występujący zapad napięcia).

Z uzyskanych przebiegów (rys.4) wynika, że nagły wzrost napięcia (występujący na skutek eliminacji zakłócenia zwarciovego – ustąpienie zapadu) generuje duży wzrost wartości prądu pobieranego przez silnik. Już niewielki (ok. 10%) skokowy wzrost wartości napięcia powoduje trzykrotny wzrost wartości prądu pobieranego z sieci, czemu towarzyszy nagły ponad trzykrotny wzrost mocy/momentu napędowego. Natomiast skokowy wzrost napięcia zasilania o 25% (rys.5) generuje około pięciokrotny wzrost wartości pobieranego prądu, co przekłada się na ponad 6-krotny nagły wzrost mocy/momentu napędowego.



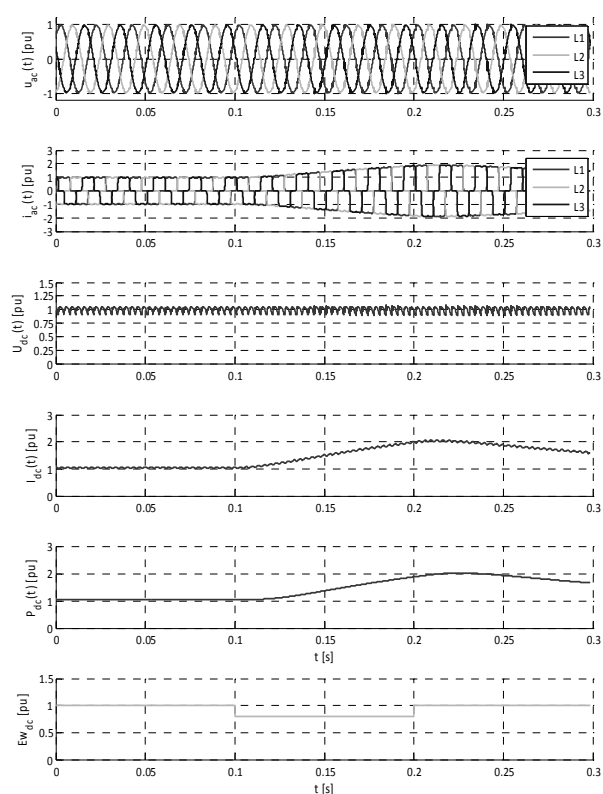
Rys.4. Przebiegi wielkości elektrycznych podczas likwidacji zapadu napięcia zasilającego analizowany napęd – 10% skok wartości napięcia (z 80% na 90% U_n)



Rys. 5. Przebiegi wielkości elektrycznych podczas likwidacji zapadu napięcia zasilającego analizowany napęd – 25% skok wartości napięcia (z 80% na 105% U_N)

Oddziaływanie zapadu napięcia również na obwód wzbudzenia prowadzi do jeszcze większych przetężeń prądowych. Przebieg wielkości elektrycznych występujących w takiej sytuacji przy zachowaniu stałej, znamionowej wartości napięcia zasilania przedstawiono na rysunku 6. Z przebiegów pokazanych na tym rysunku wynika, że 20% obniżenie napięcia wzbudzenia prowadzi do 100% wzrostu prądu w uzwojeniu twornika. W związku z tym samo obniżenie napięcia wzbudzenia również może powodować istotne przetężenia prądowe. Zatem, w niekorzystnych okolicznościach nagłe wzrosty wartości prądu, przedstawione na rysunkach 4 i 5, mogą się zwiększyć w przypadku, gdy występujący zapad napięcia będzie miał wpływ również na wartość napięcia uzwojenia wzbudzenia. Analiza dokumentacji dostarczonej przez odbiorcę przemysłowego potwierdza wystąpienie takiej możliwości w rozpatrywanym napędzie prądu stałego, gdyż uzwojenie wzbudzenia jest zasilane bezpośrednio z linii zasilającej napęd poprzez dwufazowy układ prostowniczy.

Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych widać, że liczbę wyłączeń napędów prądu stałego podczas zapadów można znacząco zmniejszyć przez odpowiednią modyfikację algorytmów sterowania. Modyfikacja mogłaby polegać na ograniczeniu zmiany kąta wysterowania tyrystorów podczas zapadów napięcia np. przez wprowadzenie ok. 150 ms opóźnienia czasu reakcji układu regulacji po gwałtownej zmianie napięcia. Ograniczenie kąta przewodzenia podczas zapadów powinno znacząco zmniejszyć przetężenia prądowe przy ustępowaniu zapadu napięcia. Ponadto, z przeprowadzonej obserwacji przykładowego procesu technologicznego wynika, że moment bezwładności części mechanicznej linii produkcyjnych jest na tyle duży, że wprowadzenie niewielkiego (tzn. 150 ms) opóźnienia czasowego w układzie regulacji nie powinno istotnie wpływać na przebieg procesu produkcyjnego.



Rys. 6. Przebiegi wielkości elektrycznych podczas zapadu napięcia wzbudzenia silnika napędu – 20% skok wartości napięcia (z 80% na 100% U_N)

Uwagi końcowe

W podsumowaniu można stwierdzić, że regulowane napędy prądu stałego, które są szeroko wykorzystywane w liniach produkcyjnych ze względu na dobre właściwości regulacyjne, wykazują bardzo dużą wrażliwość na zapady napięcia. W szczególności zapady zwarciowe, występujące w sieci zasilającej są zjawiskami, które mogą prowadzić do bardzo dużych przetężeń prądowych w analizowanych napędach, co w konsekwencji może powodować nagłe ich wyłączenie oraz uszkodzenie tyrystorowych układów sterowania tych napędów.

Przewiduje się, że odpowiednia modyfikacja algorytmów sterowania układów tyrystorowych, wsparta instalacją dławików ograniczających stromość czoła fali prądowej może być jedną z bardziej efektywnych metod ograniczenia liczby wyłączeń analizowanego układu napędowego i tym samym minimalizacji liczby wyłączeń linii produkcyjnych oraz spowodowanych nimi strat ekonomicznych odbiorcy.

LITERATURA

- [1] Kowalski Z.: Jakość energii elektrycznej. Monografie Politechniki Łódzkiej 2007.
- [2] Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej część 2 – Zapady napięcia i krótkie przerwy w zasilaniu – wpływ na pracę napędów elektrycznych o regulowanej prędkości [on-line]. Twelve Electric [dostęp 15.11.2012]. Dostęp w Internecie: <http://twelvee.com.pl>
- [3] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 50160: 2010 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych” (oryg.: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks)
- [4] Tauron Dystrybucja S.A., Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej

Autorzy: dr inż. Piotr Rzepka, dr inż. Edward Siwy, mgr inż. Mateusz Szabliski, dr inż. Bernard Witek, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Bernard.Witek@polsl.pl