

## OGRANICZENIE PRĄDU ZWARCIOWEGO PRZEZ SZEREGOWE DŁAWIKI Z UKŁADEM DIODOWYM

### STRESZCZENIE

W artykule omówiono dwa sposoby ograniczenia prądu zwarcia: pierwszy, klasyczny, realizowany przez zwiększenie impedancji obwodu (włączenie w szereg z odbiornikiem dławika) oraz drugi, wykorzystujący prosty układ energoelektroniczny. Ponadto w artykule opisano negatywne oddziaływanie obu metod na system energetyczny.

**Słowa kluczowe:** prąd zwarcia, dławik, dioda

### LIMITATION OF SHORT CURRENT BY SERIAL REACTORS WITH CIRCUIT OF DIODES

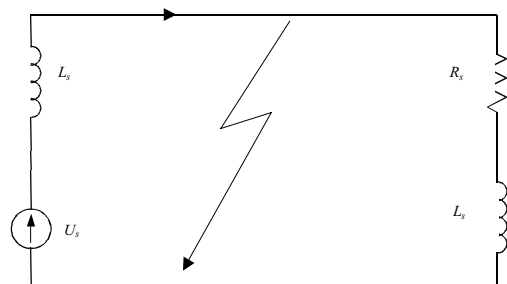
This paper presents two methods of limitation of values of short currents. The first method is achieved by increasing inductance, caused by serial connection of the additional reactor to load. This method is not recommended because of drop of other loads voltage. The second method uses a simple power electronics circuit composed of two diodes and two reactors. A comparison of efficiency and a negative influence of both methods on supply network is discussed.

**Keywords:** short current, reactor, diode

### 1. ZWARCIE W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Do najbardziej niebezpiecznych skutków zwarcia w systemie elektroenergetycznym należy zaliczyć jego działanie dynamiczne oraz termiczne.

Na rysunku 1 przedstawiono obwód przyjęty do rozważania zwarcia jednofazowego. Zwarcie takie zostało zilustrowane przykładem obliczeniowym (symulacyjnym). Do wyznaczenia wartości elementów schematu zastępczego założono, iż odbiornik zasilany jest z sieci o mocy zwarcia  $S_z = 150 \text{ MV}\cdot\text{A}$  przez transformator  $6/0,4 \text{ kV}$ ;  $S_T = 160 \text{ kV}\cdot\text{A}$ ;  $u_z = 6,8\%$ .

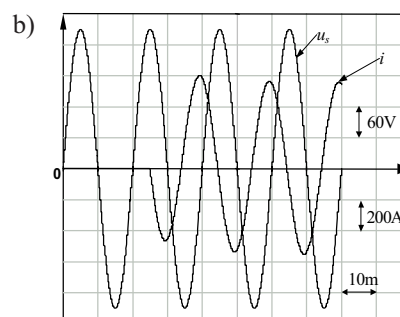
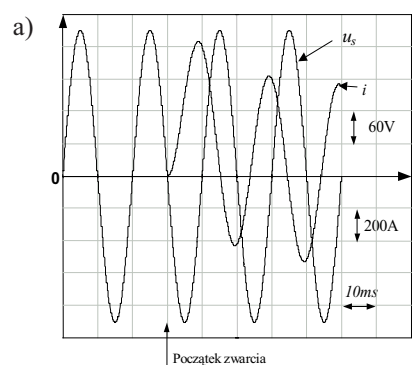


Rys. 1. Schemat elektryczny przyjęty do rozważania jednofazowego zwarcia

Z tych parametrów wyznaczono następujące wartości:

- reaktancja sieci zasilającej  $X_s = 1,17 \text{ m}\Omega$ ;
- indukcyjność sieci:  $L_s = 3,73 \text{ mH}$ ;
- reaktancja transformatora:  $X_{tr} = 68 \text{ m}\Omega$ ;
- indukcyjność transformatora:  $L_{tr} = 216 \text{ mH}$ .

Rysunek 2 przedstawia przebieg prądu zwarcia, dla układu z rysunku 1, w układzie jednej fazy z przewodem neutralnym lub symetrycznym zwarcie trójfazowym.



Rys. 2. Przebieg prądu zwarcia układu z rysunku 1  
Objaśnienia w tekście

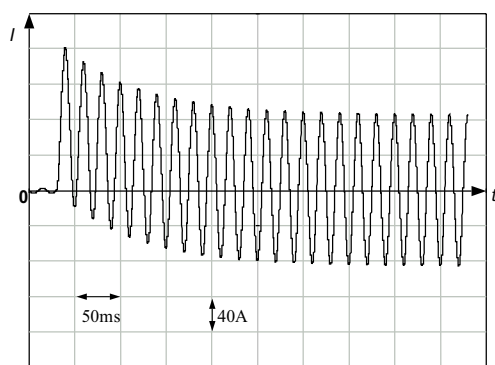
W momencie zwarcia, dla fazy początkowej  $\psi = \pi$  oraz napięcia  $u = U_m \sin \omega t$  (rys. 2a), w bardzo krótkim czasie amplituda prądu osiąga wartość ponad 800 A. Rysunek 2b przedstawia przebieg prądu zwarcia dla fazy początkowej,  $\psi = 3\pi/2$ , prąd osiąga wartość 400 A. Różnica pomiędzy oboma przypadkami jest znacząca. Dlatego dobierając aparaturę zabezpieczającą, należy uwzględnić maksymalną wartość prądu zwarcia.

\* Doktorant na Wydziale EAIiE AGH

Skutkiem przepływu prądu o dużej wartości są siły oddziałujące na przewody, które mogą spowodować ich uszkodzenie, ponadto aparatura pośrednicząca w przekazywaniu energii dobierana jest na określoną wartość prądu roboczego. Niezbędne wymiarowanie transformatorów, łączników itp. na prąd zwarcia, powoduje zwiększenie kosztów inwestycyjnych. Ponieważ cena aparatury załączającej i zabezpieczającej przed zwarciami wzrasta z wartościami prądów, dlatego poszukuje się sposobów ograniczenia szybkości narastania i amplitudy prądu zwarcia.

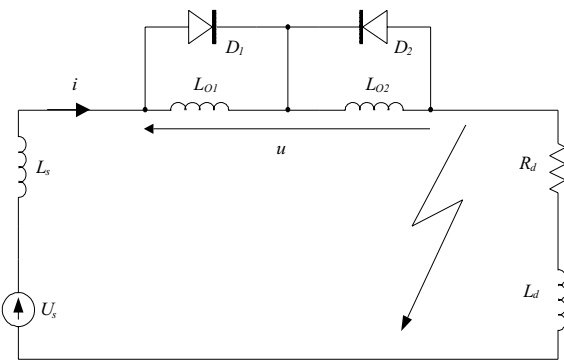
## 2. OGRANICZANIE PRĄDU ZWARCIA

Jednym z sposobów na realizację tego celu jest zmniejszenie mocy zwarcia poprzez włączenie w szereg z odbiornikiem dławika, który przy zwarcu ogranicza maksymalną wartość prądu. Wadą tego rozwiązania jest obniżenie napięcia na zaciskach odbiornika spowodowane spadkami napięcia na włączonej szeregowo reaktancji. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg prądu zwarcia z włączonym dławikiem ograniczającym o indukcyjności 20 mH (6,28 Ω).



Rys. 3. przebieg prądu zwarcia układu z rysunku 1 z dołączonym szeregowo z odbiornikiem dławikiem o indukcyjności 20 mH

Przedstawiony na rysunku 3 przebieg prądu zwarcia składa się z składowej nieokresowej, która zanika wykładniczo i jest zależna od stosunku  $L/R$  linii, oraz ze składowej okresowej wynikającej z impedancji obwodu zasilającego. Na rysunku 3 składowa przejściowa osiąga pomijalnie małą wartość po ok. 150 ms. Związane jest to z zwiększeniem reaktancji w obwodzie odbiornika. Wzrost reaktancji linii spowodował ograniczenie wartości prądu zwarcia do 80 A oraz skutkuje dodatkowymi spadkami napięcia (na tej reaktancji) w trakcie pracy odbiornika, w okresie gdy nie występuje zwarcie, co powoduje niekorzystne zmniejszenie napięcia na zaciskach odbiornika. Optymalnym rozwiązaniem byłby układ, który ogranicza wartość prądu zwarcia i nie powoduje zmniejszenia napięcia w trakcie bezawaryjnej pracy odbiornika. Rysunek 4 przedstawia schemat układu realizującego takie założenie.



Rys. 4. Schemat układu ograniczającego szybkość narastania prądu zwarcia

Indukcyjność dodatkowa została rozdzielona na dwa dławiki, każdy o tej samej indukcyjności, z równolegle przyłączonymi diodami.

Analizując działanie układu, w stanie ustalonym, należy rozpatrzyć dwa odrębne przypadki:

- 1) pracy bezzwarciowej,
- 2) pracy układu w trakcie zwarcia.

### Ad 1. Praca bezzwarciowa

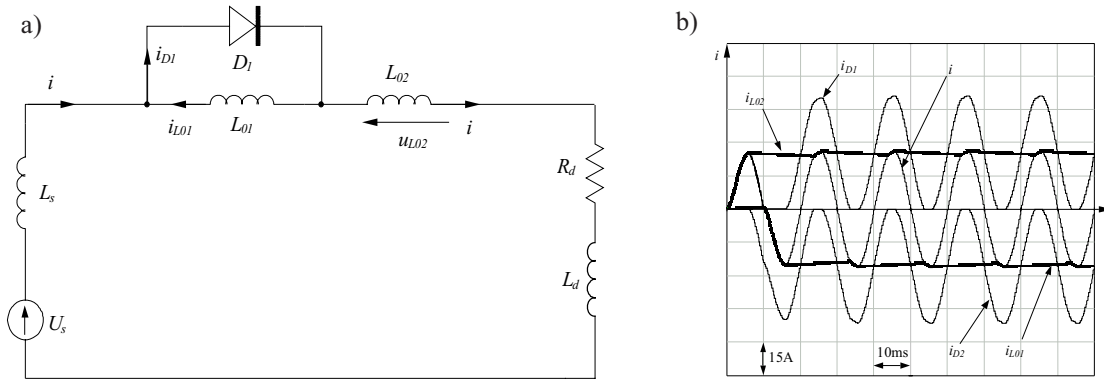
Przebiegi prądów po załączeniu układu przedstawiono na rysunku 5b. W trakcie jednego okresu napięcia źródła, można wyróżnić niżej opisane topologie układu.

- a) Załączenie układu następuje przy przejściu napięcia zasilającego przez zero (warunek przyjęty dla potrzeb symulacji i niewpływający na możliwości w zastosowaniu układu). Prąd odbiornika przepływa przez połączoną równolegle z dławikiem diodę  $D_1$ . Ponieważ kierunek przewodzenia diody  $D_2$  jest przeciwny do kierunku prądu wymuszanego przez źródło  $U_s$ , prąd odbiornika (źródła) przepływa przez dławik  $L_{O2}$ , powodując zwiększenie energii zgromadzonej w polu magnetycznym tego dławika.

Napięcie indukowane na dławiku można wyznaczyć z następującej zależności

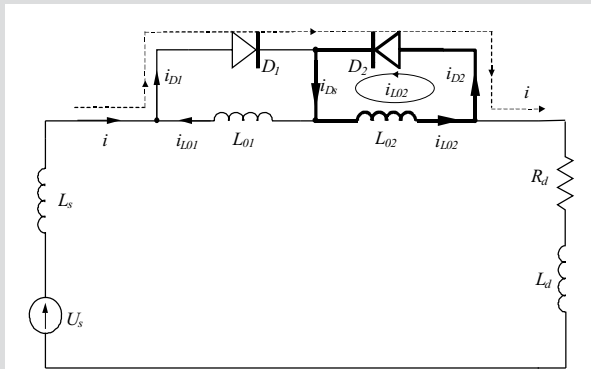
$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

W czasie pracy układu w tej topologii prąd dławika  $i_{L_{O2}}$  narasta, pochodna prądu jest większa od zera, czyli jak wynika z (1) napięcie  $u_{L_{O2}}$  jest dodatnie. Napięcie to polaryzuje diodę  $D_2$  w kierunku zaporowym. W momencie przejścia prądu źródła  $i = i_{L_{O2}}$  przez wartość amplitudową następuje zmiana znaku pochodnej prądu (chwilowe wartości prąd zaczynają maleć), a tym samym zmiana znaku napięcia indukowanego na dławiku  $L_{O2}$  i spolaryzowanie diody w kierunku przewodzenia. Wartość początkowa prądu dławika  $L_{O2}$ , dla punktu b), jest równa wartości amplitudy prądu odbiornika.



Rys. 5. Schemat układu oraz rozptyły prądu (a); przebiegi prądu w bezwarciowym odcinku pracy (b)

b) Dioda  $D_2$  rozpoczyna przewodzenie (rys. 6). Energia pola magnetycznego dławika  $L_{02}$  wymusza przepływ prądu (o wartości początkowej równej amplitudzie prądu odbiornika) przez połączoną równolegle z nią diodę  $D_2$ . Na rysunku 6 pogrubioną linią zaznaczono drogę oraz kierunek przepływu prądu wymuszanego przez dławik  $L_{02}$ . W czasie przewodzenia diody  $D_2$  prąd dławika  $L_{02}$  jest w przybliżeniu stały i równy wartości początkowej (rys. 5b). Widoczne na rysunku 5b zmniejszanie wartości prądu  $i_{L02}$  wynika z rozpraszania energii pola magnetycznego dławika  $L_{02}$  na rezystancji złącza diody  $D_2$  oraz rezystancji dławika  $L_{02}$ .



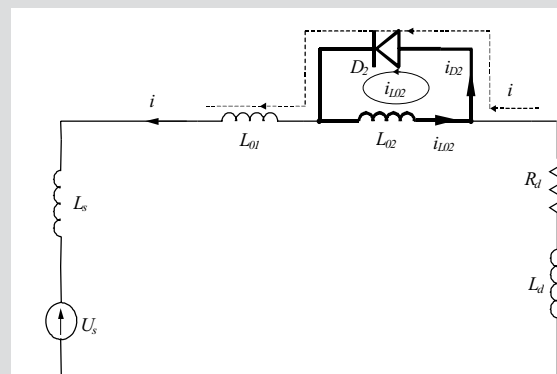
Rys. 6. Schemat układu po załączeniu diody  $D_1$

Prąd odbiornika  $i$  przepływa przez diodę  $D_1$ , w kierunku zgodnym z jej przewodzeniem, oraz diodę  $D_2$ , w kierunku przeciwnym do kierunku jej przewodzenia. Przepływ prądu odbiornika  $i$  przez diodę  $D_2$  w kierunku przeciwnym do kierunku jej przewodzenia jest możliwy, ponieważ przez tę diodę przepływa, w kierunku zgodnym, prąd wymuszany przez dławik  $L_{02}$ , przy czym chwilowa wartość prądu dławika (w przybliżeniu równa wartości amplitudowej prądu źródła) jest większa od chwilowej wartości prądu obciążenia (malejącego od momentu załączenia diody). Wypadkowy prąd diody  $D_2$  jest sumą prądu dławika  $i_{L02}$  oraz odbiornika  $i$

$$i_{D2} = i_{L2} + (-i) = i_{L02} - i \quad (2)$$

Znak minus przed prądem odbiornika  $i$  oznacza, iż ma on kierunek przeciwny do kierunku prądu dławika (oraz kierunku przewodzenia diody). W momencie gdy chwilowa wartość prądu źródła zrowna się z chwilową wartością prądu dławika  $L_{01}$  dioda  $D_1$  przestaje przewodzić i dławik  $L_{01}$ , przejmuje przewodzenie prądu źródła.

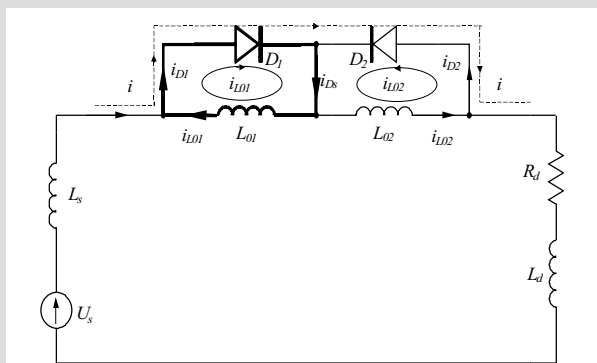
c) Dioda  $D_1$  przestaje przewodzić, układ upraszcza się do przedstawionego na rysunku 7. Drogę oraz kierunek przepływu prądu odbiornika  $i$  zaznaczono na rysunku 7 linią przerywaną. Prąd źródła  $i$  przepływa przez dławik  $L_{01}$ , powodując zwiększenie energii zgromadzonej w jego polu magnetycznym, oraz przez diodę  $D_2$ , zgodnie z kierunkiem przewodzenia tej diody. Przez diodę  $D_2$  przepływa także, w kierunku zgodnym, prąd  $i_{L02}$  wymuszany przez dławik  $L_{02}$ . Chwilowa wartość prądu diody  $D_2$  jest równa sumie chwilowych wartości prądu źródła  $i$  oraz dławika  $i_{L02}$ . Załączenie diody (podpunkt d)  $D_1$  następuje w momencie przejścia prądu odbiornika przez wartość amplitudową, wartość ta stanowi warunek początkowy prądu dławika  $i_{L02}$  w podpunkcie d).



Rys. 7. Schemat układu po wyłączeniu diody  $D_1$

d) Dioda  $D_2$  rozpoczyna przewodzenie. Na rysunku 8 linią przerywaną zaznaczono drogę przepływu prądu odbiornika  $i$ . W poprzednim podpunkcie został ustalony warunek początkowy prądu dławika  $i_{L01}$ . Prąd ten jest wymuszany przez pole magnetyczne dławika i utrzy-

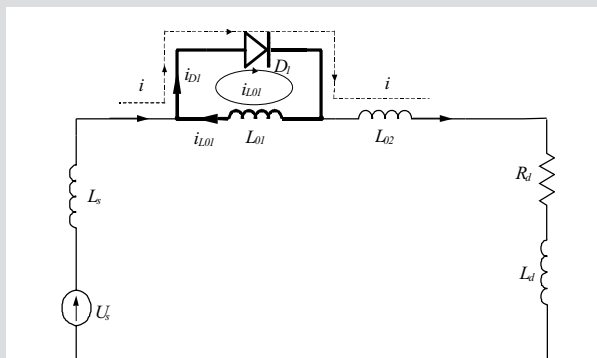
mywany (przez okres przewodzenia diody  $D_1$ ) na prawie stałej wartości. Drogę przepływu prądu dławika  $i_{L01}$ , zaznaczoną na rysunku 8 pogrubioną linią, zamyka się poprzez połączoną równoległe z dławikiem  $L_{01}$  diodę  $D_1$  (kierunek prądu dławika  $i_{L01}$  jest zgodny z kierunkiem przewodzenia diody). Przez pierwsze 5 ms od załączenia diody  $D_1$  prąd odbiornika  $i$  płynie przez tę diodę w kierunku przeciwnym do kierunku jej przewodzenia (i prądu dławika  $L_{01}$ ). Przewodzenie diody  $D_1$  jest podtrzymane przez prąd wymuszany przez dławik  $L_{01}$ , chwilowe wartości prądu tego dławika są większe niż prądu odbiornika  $i$ . Czyli przez diodę  $D_1$  przepływa różnica tych prądów i dopóki jest ona większa od zera, dioda przewodzi. Po 5 ms (rys. 5b) następuje zmiana kierunku prądu  $i$  źródła, wówczas przez diodę  $D_1$  przepływa suma prądów dławika  $L_{01}$  i odbiornika  $i$ .



Rys. 8. Schemat układu oraz rozpyły prądów przy obu przewodzących diodach

Dioda  $D_2$  przez pierwsze 5 ms przewodzi sumę prądów dławika  $L_{02}$  i odbiornika  $i$  (kierunki obu prądów są zgodne z kierunkiem przewodzenia diody). Po zmianie kierunku prądu źródła  $i$  przepływa przez  $D_2$  (w kierunku przeciwnym), odejmując się od prądu dławika  $i_{L02}$  (prąd ten jest utrzymywany na stałej wartości przez energię zgromadzoną w polu magnetycznym dławika  $L_{02}$ ). Przewodzenie diody  $D_2$  trwa do momentu zrównania się chwilowych wartości prądu odbiornika  $i$  z prądem dławika  $i_{L02}$ .

e) Dioda  $D_2$  przestaje przewodzić, schemat układu przedstawiono na rysunku 9. Drogę przepływu prądu odbiornika zaznaczono przerywaną linią. Pogrubioną linią za-



Rys. 9. Schemat układu po wyłączeniu diody  $D_2$

znaczono oczko, w którym płynie prąd wymuszany przez energię zgromadzoną w polu magnetycznym dławika  $L_{01}$ . Ponieważ kierunki prądu odbiornika  $i$  oraz dławika  $i_{L01}$  są zgodne, przez diodę  $D_1$  przepływa prąd będący sumą obu prądów, osiągając, w tym układzie połączeń, wartość dwa razy większą niż prąd odbiornika. Przez dławik  $L_{02}$  przepływa prąd źródła, powodując zwiększenie energii pola magnetycznego tego dławika. W momencie osiągnięcia przez prąd odbiornika wartości amplitudowej następuje załączenie diody  $D_2$ .

f) Przewodzą obie diody; sytuacja jest analogiczna do przypadku opisanego w podpunkcie d).

g) Dioda  $D_1$  przestaje przewodzić, rozpoczęcie nowego, powtarzalnego cyklu. Sytuacja jest taka, jak opisana w podpunkcie c).

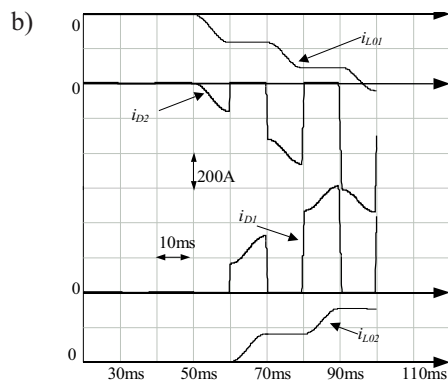
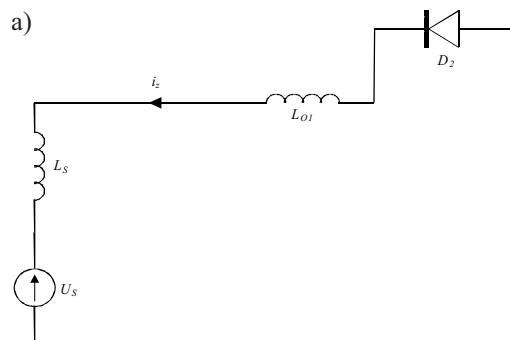
Jak zostało przedstawione, prąd odbiornika przepływa głównie przez diody, a w minimalnym stopniu przez dławiki (rys. 5, 7, 9), co ogranicza spadki napięcia wnoszone przez układ. Prąd przez dławiki przepływa przy wartości amplitudowej, uzupełniając energię pola magnetycznego.

## Ad 2. Praca układu w trakcie zwarcia

Podobnie jak w punkcie 1 można rozpatrywać układ jako superpozycję wymienionych poniżej składowych.

a) Pojawienie się zwarcia, w symulacji  $t_0 = 50$  ms.

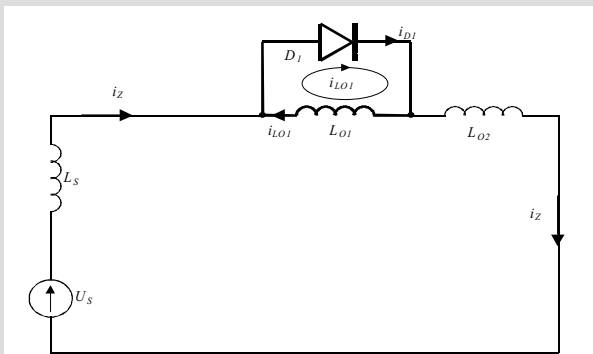
Układ upraszcza się do przedstawionego na rysunku 10a. Jak pokazano na rysunku 10b, w pierwszym półokresie napięcia sieci, prądy dławika  $L_{01}$  i diody  $D_2$  są takie same, warunki początkowe dla prądu w obwodzie  $i_0 = 0$ , prąd pracy jest wielokrotnie mniejszy niż prąd zwarcia, dlatego jest pomijany.



Rys. 10. Schemat układu w pierwszym półokresie po zwarciu (a); przebiegi prądów układu z rysunku 4 w trakcie zwarcia (b)

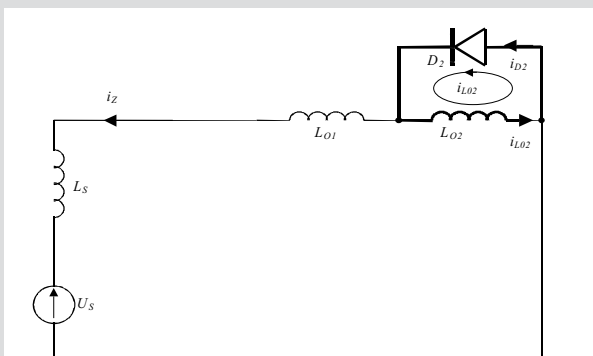
Dioda  $D_1$  jest spolaryzowana w kierunku zaporowym i nie przewodzi prądu, reaktancja dławika  $L_{02}$  jest wielokrotnie większa niż przewodzącej diody  $D_2$ , dlatego prąd przepływa przez tę diodę, natomiast prąd dławika jest równy wartości amplitudy prądu obciążenia przed zwarcie. W pierwszym półokresie od wystąpienia zwarcia prąd jest ograniczany przez reaktancję dławika  $L_{01}$ .

- b) Zmiana kierunku przepływu prądu,  $t = 60$  ms (rys. 11). Warunki początkowe dla prądu dławika  $L_{02}$  równe w przybliżeniu wartości amplitudy prądu obciążenia przed zwarcie, sytuacja analogiczna jak w punkcie 1. W poprzednim półokresie prąd dławika  $L_{01}$  osiągnął wartość ok. 190 A, energia zgromadzona w jego polu magnetycznym uniemożliwia skokową zmianę kierunku przepływu prądu, wymuszając kierunek dotychczasowy i tworząc warunek początkowy dla załączanej diody  $D_1$ . Prąd wymuszony przez energię dławika  $L_{01}$  płynie przez diodę  $D_1$ , na rysunku 10b przedstawiono, iż w trakcie przewodzenia diody  $D_1$  prąd dławika utrzymuje stałą wartość, straty powstające na rezystancji diody  $D_1$  są niewielkie, dlatego można przyjąć, iż prąd dławika ma stałą wartość.



Rys. 11. Schemat zastępczy układu po upływie 10 ms, od momentu wystąpienia zwarcia

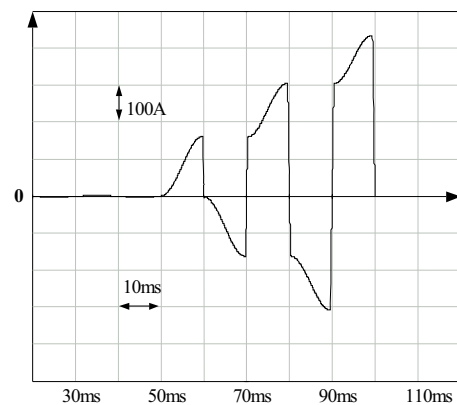
- c) Zmiana kierunku przepływu prądu,  $t = 70$  ms. Topologia układu przedstawiona jest na rysunku 12. Sytuacja analogiczna jak w punkcie b). Prąd  $I_{L02}$  jest warunkiem początkowym dla prądu diody  $D_2$ , ( $i_{D2} = i_z + i_{L02}$ )



Rys. 12. Schemat układu po jednym, pełnym okresie napięcia sieci

- d) Kolejna zmiana kierunku przepływu prądu, układ zachowuje się jak w punkcie b).

Rysunek 13 przedstawia przebieg prądu zwarcia układu z rysunku 4. Amplituda prądu w pierwszym półokresie od wystąpienia zwarcia nie przekroczyła 150 A. W następnych okresach prąd nadal narasta. Dzięki zmniejszeniu amplitudy prądu, w początkowym okresie zwarcia nie zostają uszkodzone urządzenia ucześciuczające w przesyłce energii oraz wytworzona zostaje zwłoka dająca czas układom przeciwzwarciowym na zadziałanie, np. odłączenie napięcia od zwartego odcinka sieci.



Rys. 13. Przebieg prądu zwarcia układu z rysunku 4

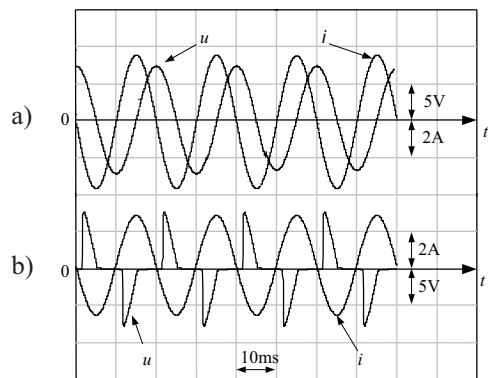
### 3. ODDZIAŁYWANIE UKŁADU NA SIEĆ ZASILAJĄCĄ

Można wykazać iż [1]

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \oint i du \quad (3)$$

Oznacza to, że jeżeli układ zasilany jest napięciem sinusoidalnym, okresowym, to obciąży on źródło mocą bierną podstawowej harmonicznej, jeżeli jego charakterystyka prądowo-napięciowa jest krzywą zamkniętą o niezerowej powierzchni. Moc bierna jest proporcjonalna do pola powierzchni ograniczonego przez tę charakterystykę. Na rysunku 15 przedstawiono wykres prądowo-napięciowy (układów z rys. 1 oraz rys. 4 w trakcie bezzwarciowego okresu pracy) sporządzony na podstawie przebiegów z rysunku 14. Przedstawiony na rysunku 15 okrąg (przebieg 1) ogranicza pole powierzchni charakterystyki prądowo-napięciowej układu z rysunku 1, natomiast zaciemniony obszar reprezentuje charakterystykę prądowo-napięciową wyznaczoną dla układu z rysunku 4 (charakterystyka 2). Na podstawie zależności 3 oraz rysunku 15 można wnioskować, iż układ z diodami pobiera mniej mocy biernej niż układ bez diod, przy niewiele bardziej skomplikowanej topologii.



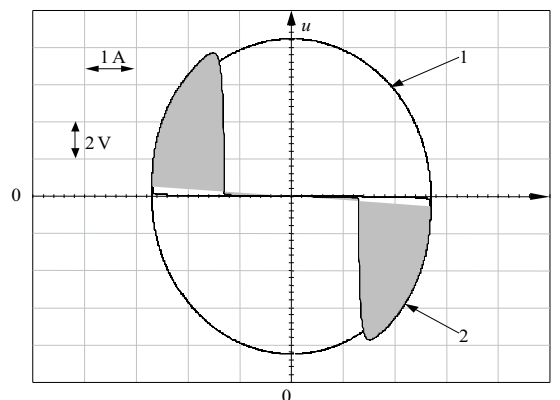


**Rys. 14.** Przebiegi prądu ( $i$ ) oraz napięcia ( $u$ ), zgodnie z oznaczeniami z rysunku 4, układów ograniczających wartość prądu zwarcia dla schematów z rysunku 1a oraz rysunku 4b

### Literatura

- [1] Piróg S.: *Energoelektronika – negatywne oddziaływanie układów energoelektronicznych na źródła energii*. Kraków, Wyd. AGH, ISBN 83-907806-6-6
- [2] Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*. Warszawa, WNK, ISBN 83-204-2218-3

Wpłynęło: 11.04.2005



**Rys. 15.** Charakterystyki prądowo-napięciowe układu ograniczającego szybkość narastania prądu zwarcia: 1 – bez diod, 2 – z włączonymi równolegle diodami



Marcin BASZYŃSKI

Autor studiował na Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki. Po ukończeniu studiów rozpoczął studia doktoranckie na tym wydziale. Niniejszy artykuł powstał w ramach studiów doktoranckich.

e-mail: mbaszyn@agh.edu.pl