

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

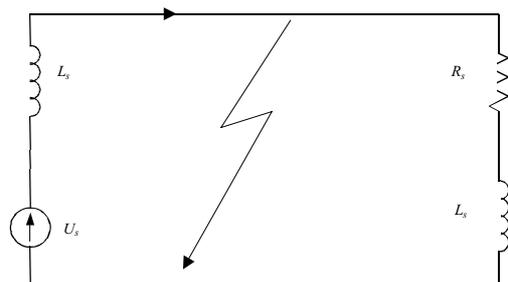
This paper presents two methods of limitation of values of short currents. The first method is achieved by increasing inductance, caused by serial connection of the additional reactor to load. This method is not recommended because of drop of other loads voltage. The second method uses a simple power 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 $6/0,4 \text{ kV}$; $S_T = 160 \text{ kV}\cdot\text{A}$; $u_z = 6,8\%$.

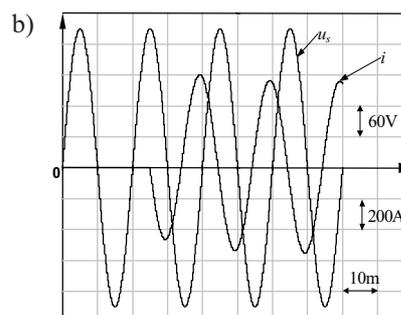
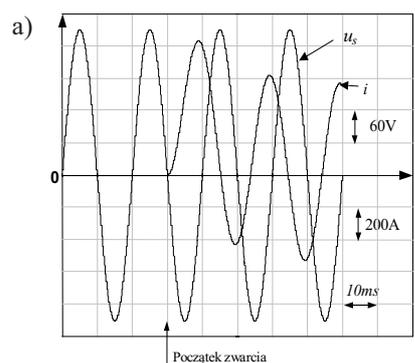


Rys. 1. Schemat elektryczny przyjęty do rozważania jednofazowego zwarcia

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

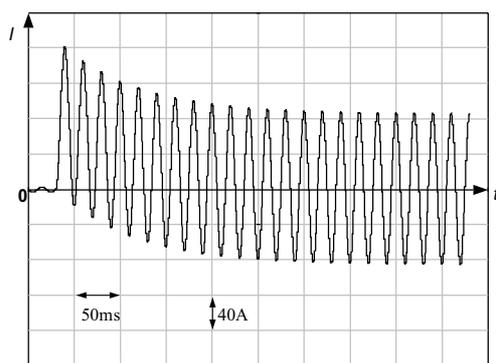
W momencie zwarcia, dla fazy początkowej $\psi = \pi$ oraz napięcia $u = U_m \sin \omega t$ (rys. 2a), w bardzo krótkim czasie amplituda prądu osiąga wartość ponad 800 A. Rysunek 2b przedstawia przebieg prądu zwarcia dla fazy początkowej, $\psi = 3\pi/2$, prąd osiąga wartość 400 A. Różnica pomiędzy oboma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

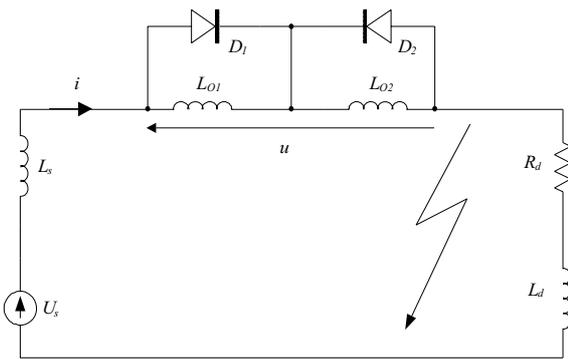
2. OGRANICZANIE PRĄDU ZWARCIA

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

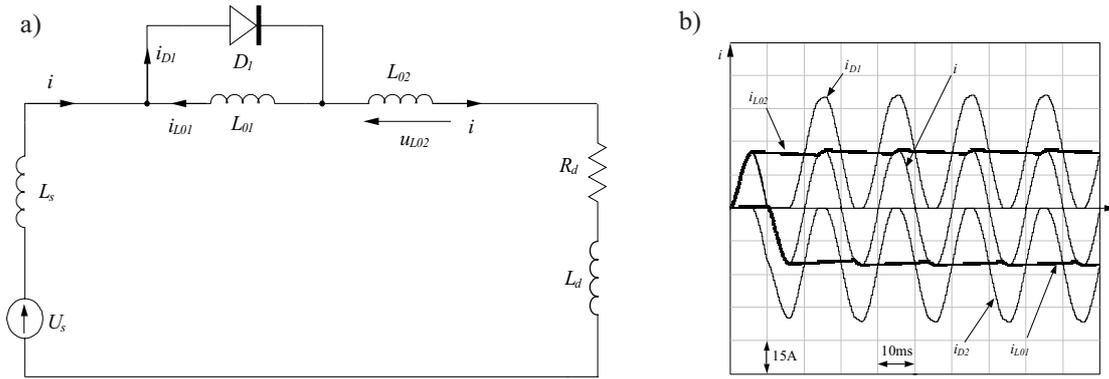
Przebiegi prądów po załączeniu układu przedstawiono na rysunku 5b. W trakcie jednego okresu napięcia źródła, można wyróżnić niżej opisane topologie układu.

- 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

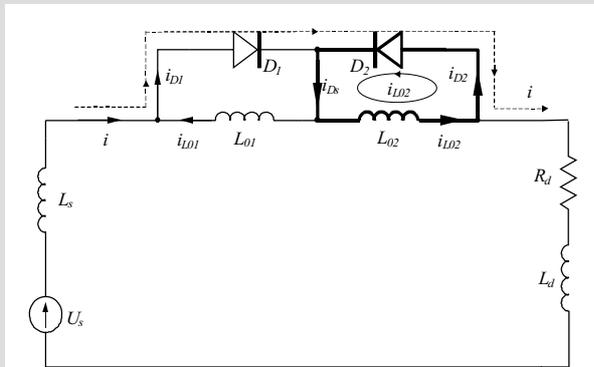
$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

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 rozplyw 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 nim 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} .



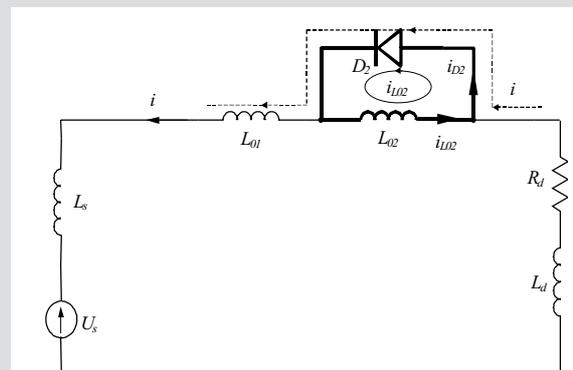
Rys. 6. Schemat układu po załączeniu diody D_1

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} , przejmując przewodzenie prądu źródła.

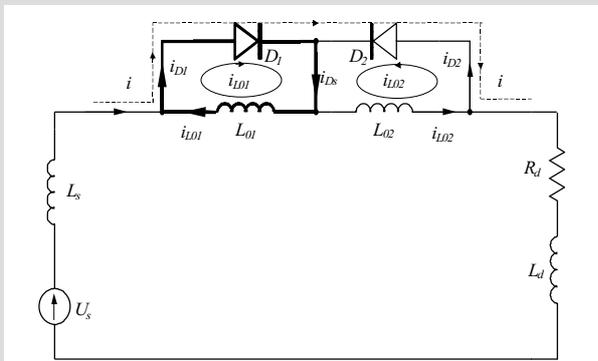
c) Dioda D_1 przestaje przewodzić, układ upraszcza się do przedstawionego na rysunku 7. Drogę oraz kierunek przepływu prądu odbiornika i zaznaczono na rysunku 7 linią przerywaną. Prąd źródła i przepływa przez dławik L_{01} , powodując zwiększenie energii zgromadzonej w jego polu magnetycznym, oraz przez 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-

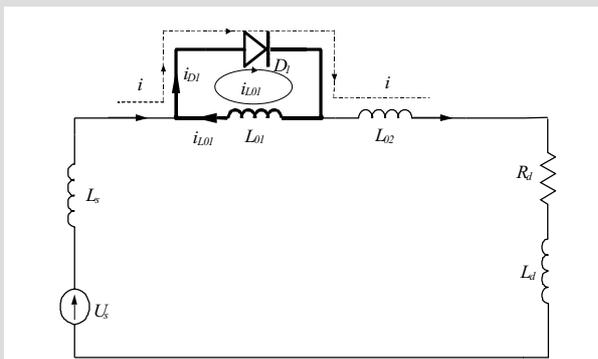
mywany (przez okres przewodzenia diody D_1) na prawie stałej wartości. Drogę przepływu prądu dławika i_{L01} , zaznaczoną na rysunku 8 pogrubioną linią, zamyka się poprzez połączoną równoległe z dławikiem L_{01} diodę D_1 (kierunek prądu dławika i_{L01} jest zgodny z kierunkiem przewodzenia diody). Przez 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).

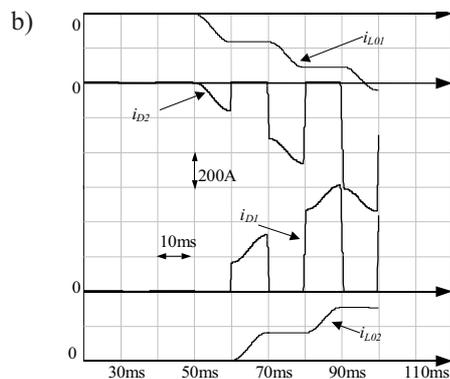
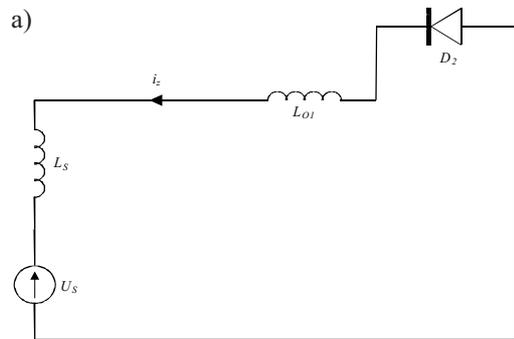
Jak zostało przedstawione, prąd odbiornika przepływa głównie przez diody, a w minimalnym stopniu przez dławiki (rys. 5, 7, 9), co ogranicza spadki napięcia wnoszone przez układ. Prąd przez dławiki przepływa przy wartości amplitudowej, uzupełniając energię pola magnetycznego.

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.

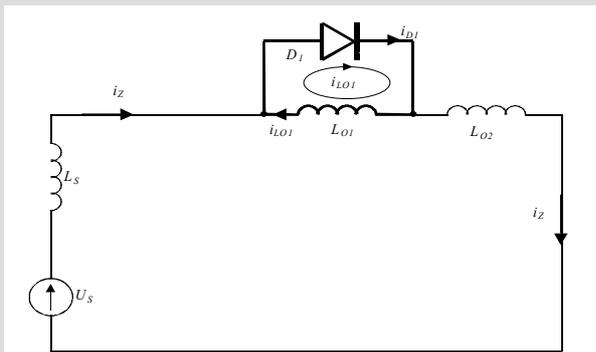
Układ upraszcza się do przedstawionego na rysunku 10a. Jak pokazano na rysunku 10b, w pierwszym półokresie napięcia sieci, prądy dławika L_{01} i diody D_2 są takie same, warunki początkowe dla prądu w obwodzie $i_0 = 0$, prąd pracy jest wielokrotnie mniejszy niż prąd zwarcia, dlatego jest pomijany.



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

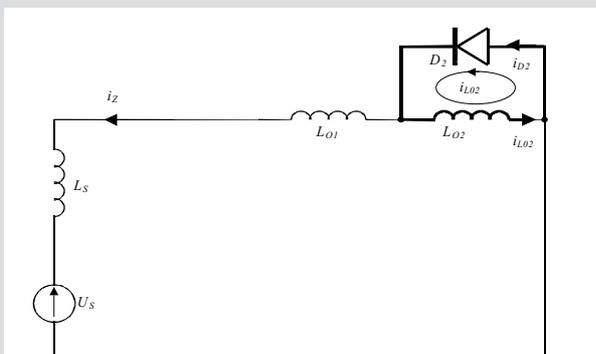
Dioda D_1 jest spolaryzowana w kierunku zaporowym i nie przewodzi prądu, reaktancja dławika L_{02} jest wielokrotnie większa niż przewodzącej diody D_2 , dlatego prąd przepływa przez tę diodę, natomiast prąd dławika jest równy wartości amplitudy prądu obciążenia przed zwarcie. W pierwszym półokresie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

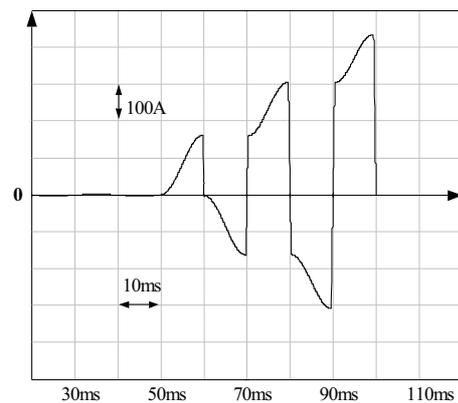
- c) Zmiana kierunku przepływu prądu, $t = 70$ ms. Topologia układu przedstawiona jest na rysunku 12. Sytuacja analogiczna jak w punkcie b). Prąd I_{L02} jest warunkiem początkowym dla prądu diody D_2 , ($i_{D2} = i_z + i_{L02}$)



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.



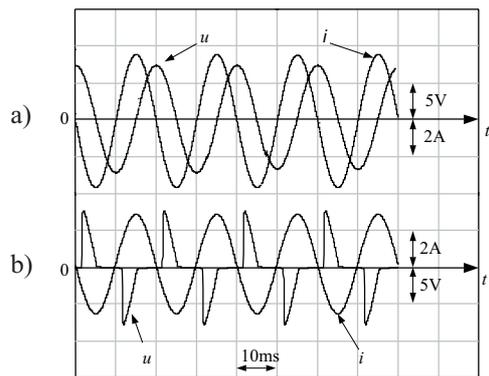
Rys. 13. Przebieg prądu zwarcia układu z rysunku 4

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.

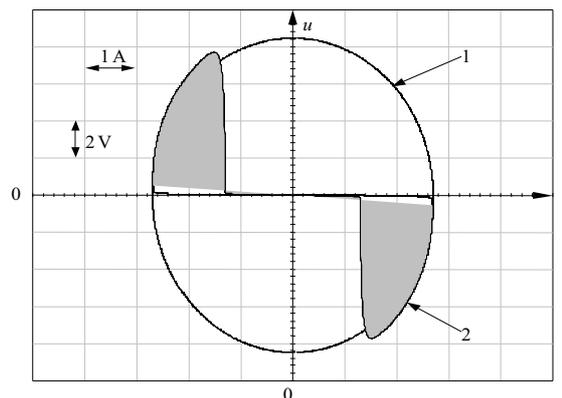


Rys. 14. Przebiegi prądu (i) oraz napięcia (u), zgodnie z oznaczeniami z rysunku 4, układów ograniczających wartość prądu zwarcia dla schematów z rysunku 1a oraz rysunku 4b

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 równoległe 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