

8. METODY OGRANICZANIA PRĄDÓW ZWARCIOWYCH

8.1. Wzrost mocy zwarciovych

Wzrost sumarycznej mocy zainstalowanej w systemie elektroenergetycznym, wzrost koncentracji wytwarzania oraz zagęszczenie siatki linii elektroenergetycznych powodują wzrost wartości mocy, prądów zwarciovych. I tak np. maksymalne wartości prądów zwarcia 3-fazowego $I_p^{(3)}$ i jednofazowego $I_p^{(1)}$ w pewnej sieci 110 kV w funkcji czasu wynosiły:

Rok	$I_p^{(3)}$	$I_p^{(1)}$
	kA	kA
1950	10,95	11,6
1955	14,25	10,8
1965	30,60	36,9
1970	39,50	44,7
1972	39,00	45,0

Można przy tym zauważyć, że od 1960 roku prąd zwarcia jednofazowego jest większy od prądu zwarcia trójfazowego. Wynika to ze wzrostu bezpośrednio uziemionych punktów gwiazdowych transformatorów i autotransformatorów. Uważa się, że wzrost mocy zwarciovych w systemie elektroenergetycznym jest o połowę wolniejszy od wzrostu mocy zainstalowanej w tym systemie. Postęp w zakresie budowy wyłączników i pozostałych urządzeń stacyjnych pozwala już obecnie na techniczne opanowanie prądów zwarciovych do 100 kA. Znacznie trudniejszym do rozwiązania jest natomiast zagadnienie ograniczenia oddziaływań na otoczenie dużych prądów doziemnych. Ogólnie biorąc, wzrost mocy zwarciovych prowadzi do wzrostu kosztów inwestycyjnych urządzeń i kosztów środków zabezpieczenia otoczenia przed działaniem prądów doziemnych. I tak np. według danych ze Szwecji koszt pola liniowego 220-400 kV wzrosło o 40-60 % przy wzroście poziomu mocy zwarciovych z 30 kA do 70 kA, a dla pola 130 kV wzrost kosztów jest o około 120 % przy wzroście prądu zwarciovego z 20 kA do 70 kA. Na podstawie danych polskich mamy:

- 110 kV o 40 % z 25 kA na 40 kA
- 110 kV o 89 % z 25 kA na 50 kA
- 220 kV o 20 % z 31,5 kA na 53 kA
- 400 kV o 20 % z 40 kA na 50 kA.

Wolniej wzrastają koszty transformatorów.

Jeszcze bardziej wyraźne i dotkliwe są przyrosty kosztów na modernizację urządzeń istniejących, np. stacji, związane z dostosowaniem tych urządzeń do wzrastających mocy zwarciovych. Koszty te rosną bardzo szybko ze wzrostem poziomu zwarciovego i z wiekiem modernizowanych stacji. Można stwierdzić, że żaden z krajów nie dopuszcza do niekontrolowanego „naturalnego” wzrostu mocy zwarciovej. Stosuje się różne środki ograniczenia mocy zwarciovych. Jest to związane z określonymi kosztami (inwestycyjnymi lub eksploatacyjnymi), które opłaca się ponieść ze względu na możliwość obniżenia kosztów urządzeń sieci przy ich słabszym wymiarowaniu zwarciovym.

8.2. Metody ograniczania mocy zwarciovych

8.2.1. Wstęp

Ograniczanie prądów zwarciovych polega na:

- zwiększaniu impedancji zwarciovej a w konsekwencji zmniejszenie prądu zwarciovego początkowego i wszystkich charakterystycznych wielkości zwarciovych,

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- b) dostatecznym szybkim wyłączeniu zwarcia zwykle przed wystąpieniem prądu zwarciovego udarowego,
- c) ograniczaniu czasu trwania zwarcia w sytuacji gdy należy ograniczyć jedynie prąd zwarciovowy cieplny.

Środki ograniczające prąd początkowy, moce zwarciovą można podzielić następująco:

- a) możliwości wynikające z optymalizacji struktury sieci,
- b) automatyczny podział sieci podczas zwarcia,
- c) zastosowanie specjalnych elementów lub urządzeń zwiększających impedancję pętli zwarciovowej czyli ograniczających prądy zwarciove.

W zależności od napięcia znamionowego, wielkości mocy zwarciovych, podaży aparatury o odpowiedniej wytrzymałości zwarciovowej, podaży urządzeń do ograniczania prądów zwarciovych, relacji kosztowych wybieramy odpowiedni sposób ograniczenia prądów zwarciovych.

Dostatecznie szybkie wyłączenie zwarcia zwykle przed wystąpieniem prądu zwarciovego udarowego zapewniają bezpieczniki i tzw. wyłączniki ograniczające.

Ograniczaniem czasu trwania zwarcia zajmuje się elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa i problemy te nie będą przedmiotem dalszych analiz.

8.2.2. Optymalizacja struktury sieci w celu ograniczenia prądów zwarciovych

W ramach optymalizacji struktury sieci w celu ograniczenia prądów zwarciovych możemy wyróżnić dwie metody podstawowe:

- a) stały podział sieci,
- b) kształtowanie odpowiednich układów połączeń sieci i stacji.

Staly podział sieci na nie współpracujące ze sobą galwaniczne części to najtańszy inwestycyjnie ale nie eksploatacyjnie środek ograniczenia prądów zwarciovych. W polskich sieciach o napięciu znamionowym mniejszym od 110 kV jest on wykorzystany całkowicie albowiem sieci te pracują jako sieci otwarte. Środek ten jest powszechnie stosowany w sieci 110 kV z tym, że ze względu na pewność zasilania odbiorców energii elektrycznej sieć ta nie pracuje jako otwarta, a tworzy się sekcje galwaniczne nie powiązane (sekcja – fragment sieci galwanicznie powiązanej). Ze względu na pewność zasilania odbiorców stosuje się sekcje zasilane z kilku (zazwyczaj trzech, czterech) transformatorów WN/110 kV lub lokalnych elektrowni usytuowanych w różnych stacjach. Podział sieci na sekcje może być:

- a) terytorialny czyli obejmujący pewien spójny obszar,
- b) przez nakładanie czyli na pewnym obszarze występuje kilka sekcji nie połączonych galwanicznie.

Podział sieci na sekcje oprócz ograniczenia prądów zwarciovych powoduje:

- a) zwiększenie strat mocy i energii,
- b) zwiększenie spadków napięć,
- c) zmniejszenie niezawodności zasilania odbiorców,
- d) zmniejsza zapas stabilności pracy sieci.

Stosowanie stałego podziału sieci tylko pozornie nie wiąże się z kosztami inwestycyjnymi. Im większy stopień sekcjonowania szyn sieci, tym większą trzeba przewidywać rezerwę przelotowości linii i transformatorów. Przewidując sekcjonowanie szyn zbiorczych stacji należy też przewidzieć urządzenia sekcjonujące i stosować układy wieloszynowe. Tak więc sieć 110 kV pracuje jako sieć zamknięta lecz sekcjonowana i spełnia rolę sieci rozdzielczej a siecią przesyłową galwanicznie połączoną na terenie kraju jest tylko sieć 220 kV i 400 kV.

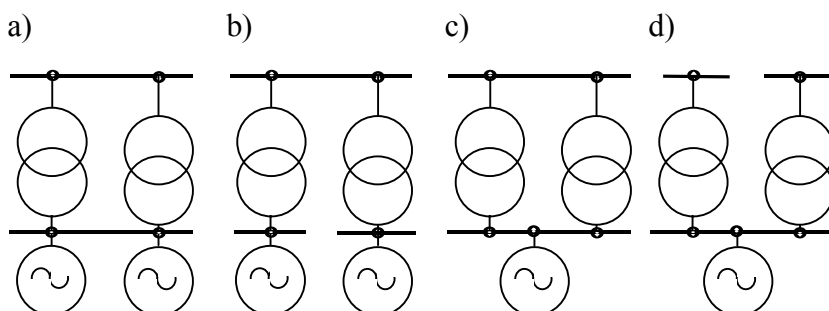
Kształtowanie odpowiednich układów sieci i stacji w celu ograniczania prądów zwarciovych jest wykorzystywane w:

- a) rozdzielniach przekazujących moc wytwarzaną w elektrowni,
- b) stacjach elektroenergetycznych.

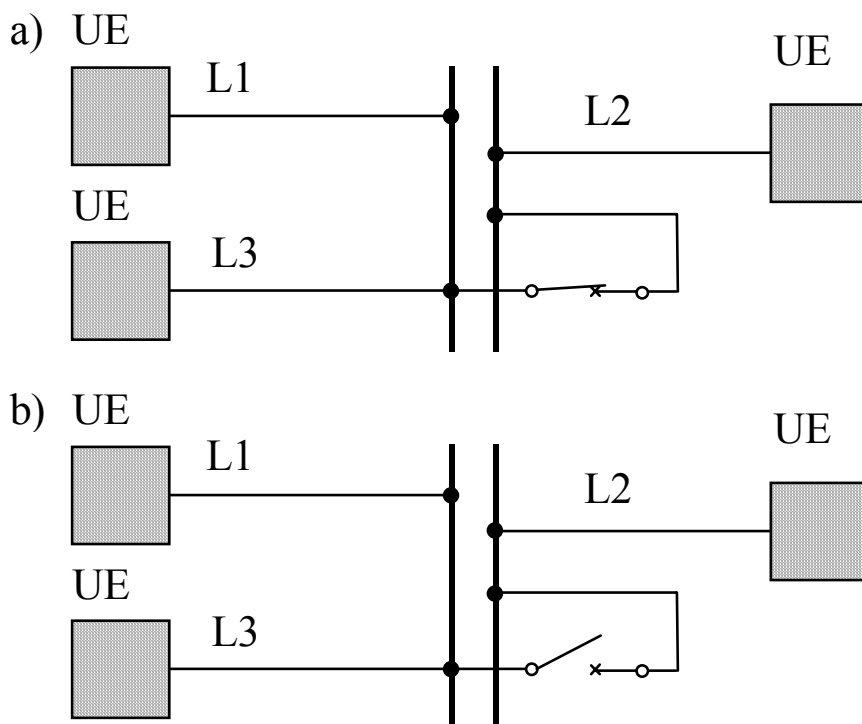
Można tu wyróżnić trzy podstawowe rozwiązania:

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- Rozcięcie połączeń równoległych wykonywane przez sekcjonowanie szyn zbiorczych na oddzielne sekcje jak pokazano na rys. 8.1.
- Rozcięcie połączeń równoległych wykonywane przez sekcjonowanie szyn zbiorczych w stacjach wieloszynowych na oddzielne szyny zbiorcze jak pokazano na rys. 8.2.
- Przenoszenie szyn zbiorczych stacji elektrownianej wraz z rosnącą mocą znamionową generatora na coraz wyższe napięcie co powoduje, że prąd zwarciovowy płynący od danego generatora przy zwarciu na szynach stacji elektrownianej jest w przybliżeniu ciągle taki sam. Na rys. 8.3 pokazano kilka wariantów takich połączeń.

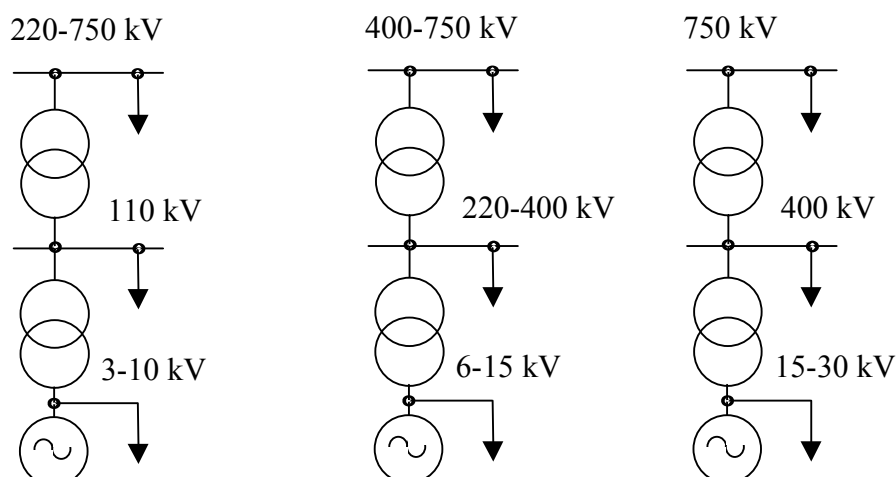


Rys. 8.1 Przykłady sekcjonowania szyn zbiorczych stacji: a) i c) układy przed sekcjonowaniem, b) i d) po rozcięciu.



Rys. 8.2 Przykłady podziału szyn zbiorczych stacji za pomocą sprzęgła poprzecznego: a) układ przed podziałem, b) po rozcięciu.

Na rys. 8.3 wariant a) dotyczy generatorów 50 – 100 MW, b) – 100 – 300 MW, c) 500 - 1200 MW. Należy zwrócić tutaj uwagę na rozwiązanie sposobu zasilania blisko leżących odbiorców na średnim napięciu np. potrzeby własne elektrowni. Występująca tu wraz ze wzrostem mocy znamionowych generatorów wielokrotna transformacja skutecznie ogranicza prąd zwarciovowy. Wielokrotna transformacja wydatnie jednak zwiększa wielkość strat energii w sieci.

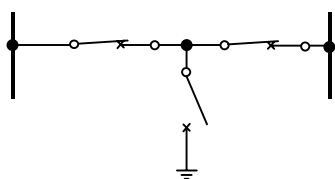


Rys. 8.3 Przykłady wyprowadzenia mocy z elektrowni o różnej mocy znamionowej bloków.

8.2.3. Automatyczny podział sieci podczas zwarcia

Niecałkowita wystarczalność opisanych powyżej, powszechnie stosowanych sposobów ograniczania mocy zwarciovych doprowadziła do poszukiwania innych specjalnych układów i urządzeń do ograniczania prądów zwarciovych. Na rys. 8.2 przedstawiono ideę układu z podziałem sieci przez otwarcie wyłącznika sprzęgłowego. Układ ten można zmodyfikować stosując ten podział podczas zwarcia za pomocą szybkiego rozłączania normalnie zamkniętego wyłącznika sprzęgłowego. Wyłącznik ten ma być wyłączany przy zwarciach na sąsiednich odcinkach linii w pierwszej kolejności, łagodząc warunki pracy wszystkich pozostałych wyłączników. W stosunku do układu z trwałym sekcjonowaniem, omawiany układ gwarantuje korzystniejsze warunki pracy (pewność zasilania, straty energii) w stanie pracy normalnej. Sposób ten posiada następujące niekorzystne cechy:

- wydłuża czas likwidacji zwarcia ze względu na konieczność czasowego, stopniowego wyłączania wyłączników,
- nie likwiduje zagrożenia przed dynamicznymi skutkami prądów zwarciovych,
- skraca czasokres między kolejnymi remontami planowymi i rewizjami wyłącznika sprzęgłowego.



Rys. 8.4 Schemat układu stacji ze zwiercem.

Część z tych wad eliminuje układ składający się ze zwierca i dwóch wyłączników w polu sprzęgła (rys. 8.4). Za cenę dodatkowego wyposażenia rozdzielni w aparaturę i pewnego skomplikowania automatyki zabezpieczeniowej uzyskuje się ograniczenie prądu udarowego pod warunkiem, że zwierce zadziała z czasem bardzo krótkim rzędu 5 ms, impulsowany stanem zaistnienia zwarcia. Pole takie można usytuować jedynie w takim miejscu systemu gdzie zamknięcie zwierca dzieli system na odrębne części. Kolejne działanie dwóch wyłączników sprzęgłowych

pozwała na rozdzielenie obu systemów szyn.

8.2.4. Przegląd specjalnych urządzeń ograniczających prądy zwarciovie

Istnieją znane z praktyki i literatury następujące specjalne środki techniczne do ograniczenia prądów zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych:

- dławiki przeciwzwarciovie,
- transformatory i autotransformatory z podwyższonym napięciem zwarcia,

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- c) sprzęgła rezonansowe,
- d) sprzęgła prądu stałego,
- e) sprzęgła kriogeniczne,
- f) specjalne układy transformatorowe,

Urządzeniem specjalnie instalowanym w celu ograniczenia prądów zwarciovych jest obecnie jedynie dławik przeciwzwarciovoy. Właściwości sprzęgieł prądu stałego istniejących w systemach elektroenergetycznych wykorzystuje się także w celu ograniczenia prądów zwarciovych lecz ze względu na ich koszt nie instaluje się ich specjalnie tylko w tym celu.

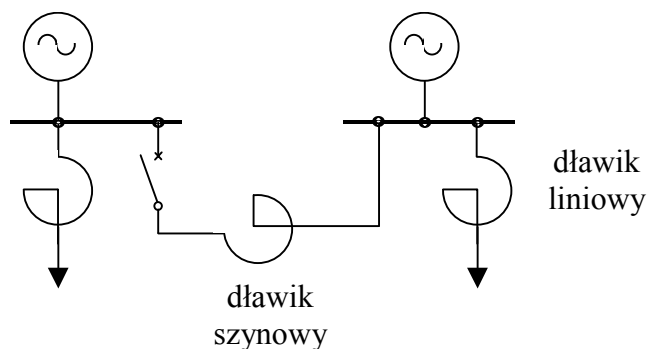
8.2.5. Dławiki przeciwzwarciove

Dławiki przeciwzwarciove to od dawna stosowane urządzenia do ograniczania prądów zwarciovych przede wszystkim w sieciach średnich napięć. Są to dławiki powietrzne, jednofazowe, których uzwojenia zalane są betonem lub żywicą epoksydową w celu zwiększenia wytrzymałości tych uzwojeń na działanie dynamiczne prądu zwarciovego. W sieci 110 kV są czynione obecnie próby półtechniczne nad zastosowaniem dławików do ograniczania prądów zwarciovych.

Duża impedancja dławika powietrznego w stanie normalnym wywołuje dodatkowe duże spadki napięć i straty mocy. Niekorzystny jest też wpływ dławików na przepięcia nieustalone powstające przy wyłączaniu prądów zwarciovych (napięcia powrotne). Jest to istotna wada w przypadku instalowania dławików w sieciach 110 kV i wyższych napięć.

Ze względu na sposób instalowania dławików rozróżnia się:

- a) dławiki liniowe – instalowane w polach odpywowych (liniowych) – rys. 8.5,
- b) dławiki szynowe – instalowane w szynach zbiorczych – rys. 8.5.



Rys. 8.5 Sieć z dławikami szynowymi i liniowymi.

Dławiki liniowe w sieciach średnich napięć instaluje się w tych rozdzielniach, gdzie ich brak spowodowałby takie powiększenie przekroju linii, że byłoby to nieopłacalne. Praktycznie takie warunki występują tylko w przypadku linii kablowych, w rozdzielniach gdzie generator jest bezpośrednio dołączony do szyn zbiorczych. W stanie pracy normalnej przez dławik liniowy płynie pełny prąd roboczy, co powoduje, że jego reaktancja nie może być zbyt duża. Dla tego rodzaju dławików reaktancje dobiera się zwykle w przedziale 3 % – 6 %.

Dławiki szynowe stosuje się wtedy, gdy ze względu eksploatacyjnych lub systemowych wymagana jest praca równoległa źródeł dołączanych do szyn zbiorczych stacji, a jednocześnie moc zwarciova przekracza wartości dopuszczalne. W przypadku zwarcia dławik szynowy stanowi dodatkową reaktancję w schemacie zastępczym obwodu zwarciovego. W szynach stosowane są zazwyczaj dławiki o dużej reaktancji 6 % - 10 %, a nawet 15 % albowiem w warunkach pracy normalnej przez dławiki szynowe nie przepływają na ogół prądy robocze.

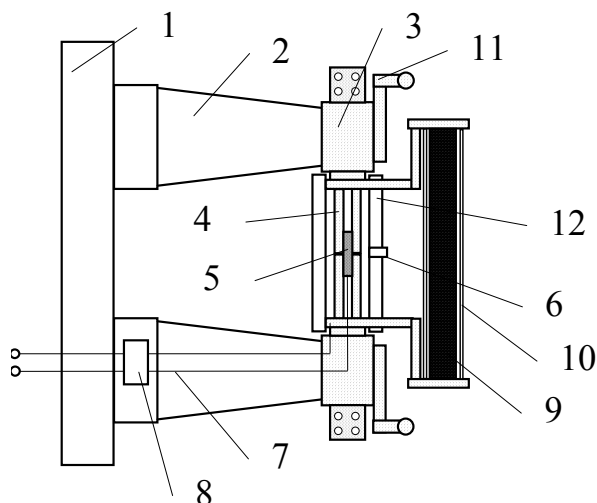
8.2.6. Wyłączniki ograniczające

W wyłącznikach ograniczających następuje wtrącanie w obwód zwarciovy dużych rezystancji zaraz po powstaniu zwarcia:

- a) Łuku powstającego między rozchodzącymi się stykami wyłącznika zwanego wyłącznikiem ograniczającym. Są tu dwa podstawowe rozwiązania:
 - 1) styki rozchodzą się pod wpływem sił elektrodynamicznych prądu zwarciovygo tzw. odrzutu elektrodynamicznego styków,
 - 2) styki rozchodzą się pod wpływem działania elektromagnesów otwierających styki przez cewki, w których płynie prąd zwarciovy.
- b) Łuku powstającego w specjalnych ogranicznikach działających na zasadzie bezpiecznika lecz nie wyłączającego prądu zwarciovygo. Prąd zwarciovy jest wyłączany za pomocą wyłącznika. Jest to tzw. wyłącznik dobezpieczony.

Po wyłączeniu ogranicznik trzeba wymienić choć znane są już układy samoregenerujące się.

Poniżej zostanie omówione inny sposób ograniczania wielkości zwarciovych poprzez bardzo szybkie wyłączenie prądu zwarciovygo, wyłączenie przed wystąpieniem prądu zwarciovygo udarowego. Jedno z takich rozwiązań nazywane ogranicznikiem typu I_S oferowane jest obecnie przez firmę ABB Calor Emag. Budowę tego typu ogranicznika pokazano na rys. 8.6.



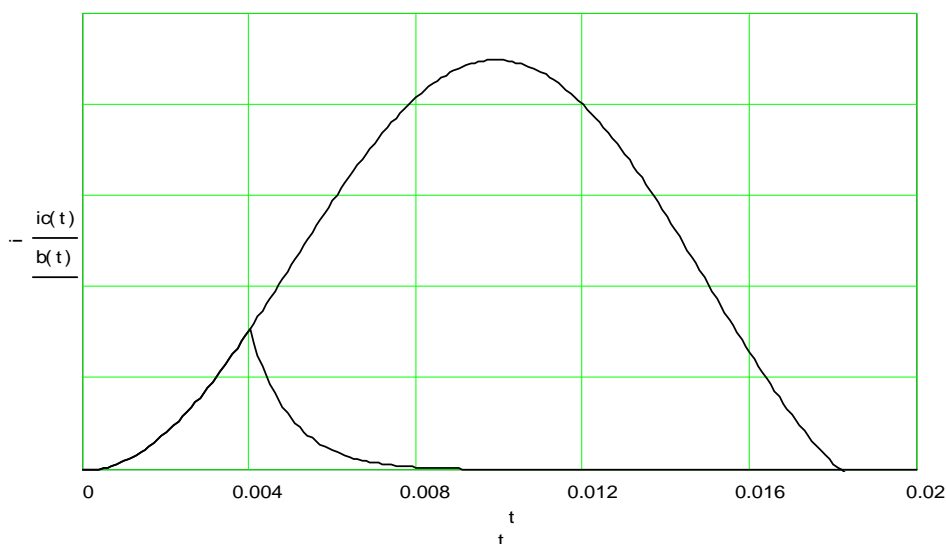
Rys 8.6 Budowa ogranicznika typu I_S , gdzie:

- 1 - podstawa ogranicznika,
- 2 - izolator,
- 3 - przewodząca główka izolatora,
- 4 - styki główne,
- 5 - element wybuchowy,
- 6 - wskaźnik styków głównych,
- 7 - przewód przewodzący impuls wywołujący wybuch materiału wybuchowego,
- 8 - transformator impulsowy,
- 9 - bezpiecznik,
- 10 - obudowa bezpiecznika,
- 11 - rączka elementu uwalniającego wkładkę ogranicznika,
- 12 - obudowa styku głównego.

W stanie pracy normalnej prąd płynie przez styki główne ogranicznika (4) a nie przez bezpiecznik (9) co wynika z wartości rezystancji obu dróg prądu. Bezpiecznik posiada element przewodzący o małym przekroju. W momencie zwarcia układ pomiarowy wykrywa bardzo szybko, w czasie ok.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$2 \div 4$ ms stan zwarcia. Takie szybkie wykrywanie zwarcia jest możliwe jedynie poprzez analizę nachylenia krzywej prądu – analizy pochodnej prądu po czasie. Po wykryciu stanu zwarcia układ pomiarowy przesyła impuls do transformatora impulsowego (8) za pomocą którego dociera on do materiału wybuchowego (5) umieszczonego pomiędzy stykami głównymi. Materiał ten wybuchając rozrywa styki główne gasząc łuk palący się pomiędzy nimi. Cały prąd zaczyna płynąć przez bezpiecznik powodując jego szybkie przepalenie. Taki ogranicznik powoduje, że prąd zwarcia jest wyłączony w czasie krótszym niż występuje prąd zwarcia udarowy. Przebieg prąd zwarcia i prądu po zadziałaniu ogranicznika pokazano na rys. 8.7.



Rys. 8.7 Przebieg prądu zwarcia i prądu po zadziałaniu ogranicznika.

Po zadziałaniu ogranicznika trzeba wymienić tzw. wkładkę ogranicznika czyli styk główny, jego obudowę oraz bezpiecznik. Dokonuje się tego za pomocą specjalnej rączki elementu uwalniającego wkładkę ogranicznika.

Wyłączniki ograniczające proponuje się stosować w:

- Sprzęgle podłużnym,
- Równolegle z dławikiem przeciwzwarciowym,
- W polu zasilającym rozdzielni z sieci elektroenergetyki zawodowej gdy rozdzielnia ta posiada dodatkowe zasilanie z własnej elektrowni,
- W polu liniowym.

W tabl. 8.1 podano parametry znamionowe ograniczników typu I_S produkowanych przez firmę ABB Calor Emag. W tych danych zwracają uwagę:

- Brak w parametrach znamionowych tych ograniczników prądu załączalnego czy wyłączalnego. Firma podaje jedynie maksymalny prąd zwarcia początkowy sieci, przy którym może pracować ogranicznik i wynosi on 50 kA.
- Bardzo duże prądy znamionowe, przy których może pracować ogranicznik.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Tabl. 8.1 Parametry znamionowe wyłączników ograniczających typu I_S .

Napięcie znamionowe	V	750	12000	12000	17500	17500	24000	36000/ 405000
Prąd Znamionowy	A	1250/ 2000/ 3000/ 4000	1250/ 2000	2000/ 3000/ 4000	1250/ 2000	2000/ 3000/ 4000	1250/ 1600/ 2000/ 2500	1250/ 2000/ 2500
Wytrzymałość napięciowa przy częstotliwości 50/60 Hz	kV	3	28	28	38	38	50	80
Wytrzymałość napięciowa przy napięciu udarowym	kV	-	75	75	95	95	125	200
Waga ogranicznika	kg	23/27,5/ 42/78	23/27,5	65	23/27,5	65	27/31,5/ 33/33	60
Waga wkładki	kg	10/10,5/ 11/14	12/12,5	15,5	14/14,5	17,5	19/19,5/ 24/24	42
Szerokość	mm	180/180/ 206/246	180	180	180	180	180	240
Wysokość	mm	637/651/ 754/1000	637/651	951	637/651	951	740/754/ 837/837	1016
Głębokość	mm	493/500/ 420/460	503/510	509	503/510	509	553/560/ 560/560	695

8.2.7. Ograniczanie prądów zwarć doziemnych

Obecnie bardzo istotnym problemem jest ograniczanie prądów zwarć doziemnych w sieciach o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym. W sytuacji gdy reaktancja składowej zerowej jest mniejsza od reaktancji składowej zgodnej prąd zwarcia jednofazowego jest większy od prądu zwarcia trójfazowego. W tej sytuacji należy dążyć do zmniejszenia prądu zwarcia jednofazowego. Uzyskujemy to poprzez:

- powiększanie impedancji uziemień punktów zerowych,
- odziemianie uziemień punktów zerowych wybranych transformatorów,
- otwieranie uzwojeń wyrównawczych transformatorów i autotransformatorów,
- włączanie dławików w uzwojenia wyrównawcze transformatorów i autotransformatorów.

8.3. Pytania kontrolne

- Celowość stosowania dławików liniowych.
- W jakich układach stosujemy dławiki liniowe.
- Omówić dodatnie i ujemne cechy zastosowania w sieci dławika szynowego.
- Jak działa ogranicznik typu I_S ?
- Sposoby ograniczania wartości prądów zwarć z udziałem ziemi w sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym.