

dr inż. GRZEGORZ BRODZIŃSKI
dr inż. ALEKSANDER LISOWIEC
Instytut Tele-i Radiotechniczny, Warszawa
dr inż. WITOLD DZIERŻANOWSKI
Instytut Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław

Przetworniki pola magnetycznego nowej generacji w zabezpieczeniach ziemnozwarciowych kopalnianych linii energetycznych

Przedstawiono wyniki badań przetworników pola magnetycznego (w postaci cewek Rogowskiego) oraz przetworników hallotronowych w układach zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

1. WSTĘP

W sieciach energetycznych niskich i średnich napięć, zwłaszcza w sieciach kopalnianych istnieje zapotrzebowanie na tanie i czułe zabezpieczenia od zwarć międzyfazowych i doziemnych. Szybkie i niezawodne wykrywanie i likwidacja zwarć w kopalnianych sieciach średniego napięcia ma istotne znaczenie ze względu na wysokie wymagania dotyczące niezawodności pracy urządzeń oraz bezpieczeństwa.

W dotychczasowych, konwencjonalnych rozwiązaniach zabezpieczeń stosuje się przetworniki transformatorowe charakteryzujące się dużymi wymiarami oraz wysoką ceną. Ograniczony zakres dynamiki dotychczasowych rozwiązań wymaga stosowania oddzielnych przetworników do zabezpieczeń od zwarć międzyfazowych i zwarć doziemnych. Ponadto, konwencjonalne rozwiązania zabezpieczeń ziemnozwarciowych nie gwarantują należytej czułości, a w szczególności podczas zwarć wysokoenergetycznych. W praktyce zdarza się, że nie mogą być one dostatecznie czułe nastawione z uwagi na, przede wszystkim, względnie duże uchyby przetworników transformatorowych zasilających wejścia pomiarowe.

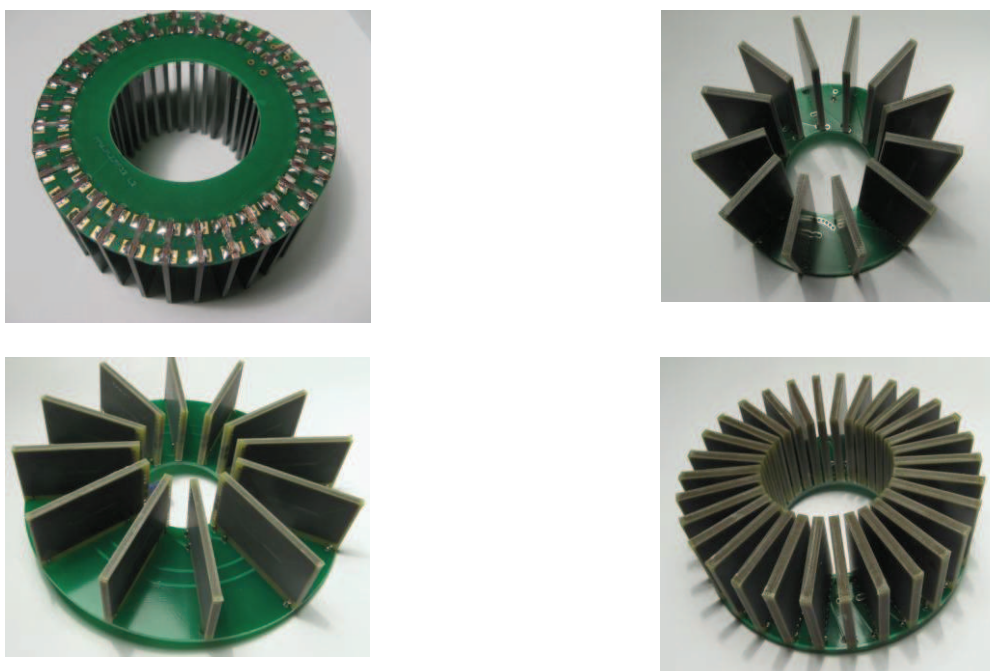
W ramach projektu badawczo-rozwojowego [1] zostały opracowane nowe konstrukcje przetworników pola magnetycznego, w postaci cewek Rogowskiego, oraz przetworników hallotronowych.

Konstrukcje cewek Rogowskiego oparto na wielowarstwowych obwodach drukowanych. Prace zmierzały do opracowania typoszeregu cewek Rogowskiego do zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Przetworniki hallotronowe zostały opracowane pod kątem zastosowania w zabezpieczeniach ziemnozwarciowych, szczególnie zabezpieczeniach kierunkowych.

2. TECHNOLOGIA PCB DO WYTWARZANIA PRZETWORNIKÓW BEZRZDENIOWYCH

Konstrukcję cewek Rogowskiego w technologii obwodów drukowanych (PCB) oparto na 16- oraz 8-warstwowych płytkach drukowanych. Na każdej z warstw znajduje się spiralnie nawinięta cewka indukcyjna, przy czym cewki sąsiednich warstw są połączone przelotkami. Wielowarstwowe płytki są mocowane na mającej kształt pierścienia płytce bazowej w ten sposób, że wzdłuż obwodu pierścienia tworzy się solenoid. Czułość cewki Rogowskiego, tzn. wartość napięcia skutecznego na wyjściu gdy prąd w obwodzie pierwotnym ma wartość 1 A i częstotliwość 50 Hz, zależy od ilości płytek wielowarstwowych umocowanych w płytce bazowej na jednostkę obwodu oraz od wypadkowego pola przekroju pojedynczego zwoju.

Przykładowe konstrukcje opracowanych cewek Rogowskiego zostały pokazane na rys. 1.



Rys. 1. Konstrukcje cewek Rogowskiego

Tabela 1

Możliwe do osiągnięcia wartości czułości przetworników

Rodzaj płytki bazowej wraz z cewką	CRP30 cewka kwadratowa	CRP30 cewka prostokątna	CRP12 cewka kwadratowa	CRP12 cewka prostokątna	CRP12L cewka prostokątna
Czułość przetwornika	3,5 mV/A	7,5 mV/A	1,6 mV/A	3 mV/A	1,4 mV/A

Tabela 2

Parametry cewek Rogowskiego

	R [Ω]	L [mH]	C [pF]	f_0 [kHz]	Q	ξ	R_{kr} [k Ω]
CPrPoz	802	11.18	43.63	227.863	20	0.025	7.8
CPrPion	762	7.9	73.47	208.884	13.6	0.037	5
CKw	1000	19.77	64.32	141.138	17.5	0.029	8.5

3. PARAMETRY CEWEK ROGOWSKIEGO WYKONANYCH W TECHNOLOGII PCB

Cewki Rogowskiego do zabezpieczeń ziemnozwarciowych powinny się charakteryzować następującymi cechami:

- dużą czułością,
- odpornością na zewnętrzne zakłócające pola magnetyczne,
- powtarzalnością parametrów między poszczególnymi egzemplarzami.

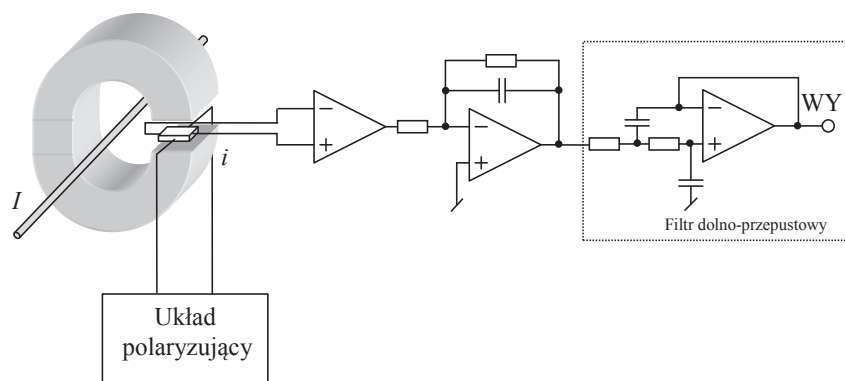
Parametry opracowanych cewek Rogowskiego przedstawiono w tabeli 1. Maksymalna osiągnięta czułość to 7,5 mV/A. Zalety cewek Rogowskiego w zabezpieczeniach nadprądowych są ogólnie znane:

- bardzo duża dynamika,
- doskonała liniowość,

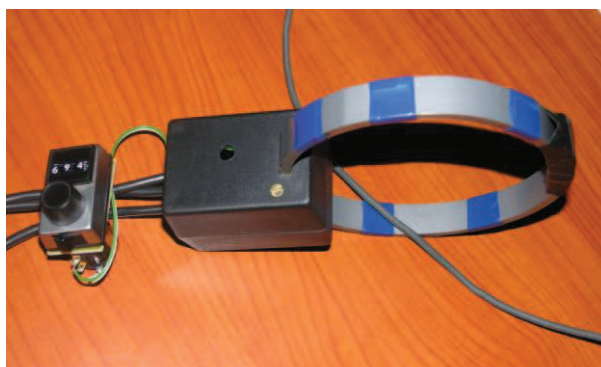
Pewną wadą jest jednak konieczność całkowania sygnału wyjściowego, zwłaszcza gdy sygnał prądowy zawiera duże ilości harmonicznych.

4. CEWKI ROGOWSKIEGO WYKONANE W TECHNOLOGII PCB W ZABEZPIECZENIACH ZIEMNOZWARCIOWYCH

O ile w układzie Holmgrena z tradycyjnymi przedkładnikami prądowymi następuje sumowanie prądów, to w układzie z cewkami Rogowskiego następuje sumowanie napięć z cewek połączonych szeregowo. Układ taki został wykonany w ramach projektu oraz przebadany na modelu fizycznym sieci średniego napięcia [2].



a) schemat blokowy



b) wykonany prototyp użyty do badań

Rys. 2. Przetwornik pola magnetycznego wykorzystujący czujnik Halla

Wykorzystanie przetworników bezrdzeniowych w układach sumacyjnych – jako filtru prądu kolejności zerowej – wymaga starannego ich wykonania. Przewód roboczy powinien być ułożony koncentrycznie w oknie przetwornika, charakterystyki $U_{wy}(I)$ przetworników powinny się jak najmniej różnić, obwody wyjściowe powinny być ekranowane [3].

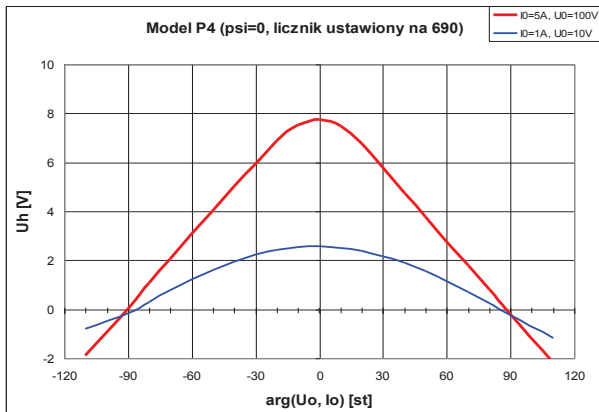
W przypadku próby wykorzystania przetworników bezrdzeniowych jako filtru prądu kolejności zerowej należy brać pod uwagę cechy takiego filtru związane z przenoszeniem wyższych harmonicznych, zawartych w mierzonym prądzie. Jeśli prądy fazowe w kablu są odkształcone, to na wyjściu filtru występuje sygnał o amplitudzie i kształcie zależnym od zawartości wyższych harmonicznych w prądzie pierwotnym nawet wtedy, gdy zwarcie doziemne nie występuje. W związku z tym na wyjściu (wejściu) wzmacniacza WR należy umieścić filtr całkujący.

W przypadku, gdy cewki Rogowskiego współpracują z zabezpieczeniem ziemnozwarciowym z cyfrową obróbką sygnałów, bardziej racjonalnym może okazać się rozwiązanie, polegające na cyfrowym sumowaniu prądów wyjściowych cewek Rogowskiego zainstalowanych w poszczególnych fazach kabla, po wcześniej dokonanej filtracji sygnałów z cyfrową implementacją operacji całkowania.

5. PRZETWORNIKI POLA MAGNETYCZNEGO WYKORZYSTUJĄCE CZUJNIK HALLA

Ogólny schemat przetwornika pola magnetycznego wykorzystującego czujnik Halla, bez sprzężenia zwrotnego, został przedstawiony na rys. 2. Układ polaryzacji czujnika może mieć charakter źródła prądowego lub napięciowego. W przypadku czujników Halla o takim samym znaku współczynnika temperaturowego napięcia Halla i współczynnika temperaturowego rezystancji, korzystnie jest polaryzować czujnik źródłem napięciowym, gdyż wtedy zachodzi kompensacja wpływu temperatury na napięcie wyjściowe czujnika.

W przypadku, gdy czujnik Halla zostanie spolaryzowany stałym prądem lub napięciem, napięcie na wyjściu układu z rys. 2 jest proporcjonalne do prądu I płynącego w obszarze obejmowanym przez magnetowód. Układ ten można zastosować do zabezpieczenia nadprądowego. Przetworniki hallotronowe w zastosowaniu do zabezpieczenia nadprądowego wykazują jednak pewne wady, takie jak: zależność napięcia wyjściowego od temperatury, nieliniowość związana z nieliniowością charakterystyki czujnika Halla oraz ograniczona dynamika.



Rys. 3. Zależność składowej stałej napięcia wyjściowego modelu hallotronowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami wejściowymi dla kąta wewnętrznego ustawionego na wartość $\Psi=0$

6. PRZETWORNIKI HALLOTRONOWE W ZABEZPIECZENIACH ZIEMNOZWARCIOWYCH

W przypadku, gdy prąd polaryzujący czujnik Halla jest proporcjonalny do napięcia kolejności zerowej U_0 , a prąd I jest równy składowej zerowej prądu $3I_0$, napięcie wyjściowe czujnika jest proporcjonalne do iloczynu U_0 i $3I_0$, a składowa stała tego napięcia jest proporcjonalna do cosinusa kąta przesunięcia fazowego między U_0 i $3I_0$, rys. 3. Otrzymujemy w ten sposób układ zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego.

W ramach projektu przebadano model hallotronowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego o charakterystyce kierunkowej, w warunkach inicjowanych zwarć doziemnych w rzeczywistej sieci kablowej średniego napięcia 6 kV i 20 kV.

Z uwagi na to, że w obu sieciach stosowana była kompensacja ziemnozwarciowego prądu oraz układy automatyki do wymuszania składowej czynnej prądu AWSCz, w modelu – na potrzeby badań – nastawiono kąt maksymalnej czułości na wartość 0° , zgodnie z zasadami nastawiania ziemnozwarciowych zabezpieczeń kierunkowych dla takich sieci. Brano to pod uwagę podczas oceny wartości sygnału wyjściowego modelu podczas każdej próby.

Podczas wszystkich prób rejestrowano przebiegi sygnałów wejściowych i wyjściowych modelu i na tej podstawie oceniano poprawność jego działania.

Przeprowadzono próby działania modelu dla różnych charakterystycznych warunków, w jakich może pracować zabezpieczenie ziemnozwarciowe w rzeczywistych sieciach, dotyczących rodzaju zwarcia

doziemnego (metaliczne, oporowe, wysokooporowe), lokalizacji zwarcia względem miejsca zainstalowania modelu (zwarcie wewnętrzne, zwarcie zewnętrzne), obciążenia kabla (bez obciążenia, z obciążeniem) i stopnia kompensacji ziemnozwarciowej sieci (przekompensowanie, niedokompensowanie).

Na podstawie szczegółowej analizy wyników przeprowadzonych prób sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. W każdej próbie badany model zabezpieczenia ziemnozwarciowego prawidłowo lokalizował miejsce wystąpienia doziemienia.
2. Składowa stała sygnału wyjściowego badanego modelu w niektórych przypadkach przyjmowała bardzo małe wartości, co mogłoby świadczyć o małej czułości zabezpieczenia. Jednak szczegółowa analiza takich przypadków wykazała, że dotyczyło to tych zwarć, podczas których kąt przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami wejściowymi modelu był bliski 90° , zatem pomiar odbywał się na skraju charakterystyki kierunkowej czynnomocowej modelu.
3. Próby wykazały, że hallotronowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe o charakterystyce kierunkowej, czynnomocowej może nie mieć możliwości wykrycia zwarcia i poprawnego zlokalizowania linii doziemionej podczas zwarć doziemnych wysokooporowych, jeśli nie poprawi się warunków pomiaru poprzez np. wymuszenie składowej czynnej prądu o odpowiedniej wartości.
4. W jednej z wykonanych prób ziemnozwarciowych stwierdzono zawiedzenie kierunkowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego zainstalowanego w polu, w którym inicjowano zwarcie. Analiza zarejestrowanych przebiegów wykazała, że badane zabezpieczenie hallotronowe w tych warunkach może wykryć zwarcie z wystarczającą czułością.
5. Aby hallotronowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe było odpowiednio czułe, wartość rozruchowa składowej stałej sygnału $UH=$, nastawiona w zabezpieczeniu, powinna być możliwie mała, ale wyższa od maksymalnego sygnału uchybowego zabezpieczenia. Należy mieć na uwadze przede wszystkim sygnał uchybowy, jaki pojawia się na wyjściu układu pomiarowego tego zabezpieczenia powodowany prądami obciążenia, a zwłaszcza prądami płynącymi w zabezpieczanym kablu podczas rozruchu silników. Z pomiarów wynika, że sygnał uchybowy w analizowanych warunkach może dochodzić do ok. 20% maksymalnej wartości sygnału $UH=$.
6. Niekorzystną cechą modelu przetwornika hallotronowego, stwierdzoną podczas badań laboratoryjnych jest to, że na jego wyjściu pojawia się sygnał

uchybowy dochodzący do 20% maksymalnej wartości użytecznego sygnału UH – nawet wtedy, gdy sygnał wejściowy U_0 ma zerową wartość. Zjawisko to wynika z niesymetrii czujnika Halla, gdyż dla zerowej wartości U_0 prąd płynący przez czujnik przyjmuje stałą wartość. W dalszych pracach nad rozwiązaniem technicznym hallotronowego zabezpieczenia należy szukać sposobu redukcji tego błędu lub rozważyć celowość blokowania zabezpieczenia przy odpowiednio małej wartości napięcia U_0 .

7. Istnieje możliwość zmniejszenia sygnału uchybowego hallotronowego zabezpieczenia powodowanego prądami roboczymi chronionego kabla poprzez zastosowanie w tym zabezpieczeniu odpowiednio wykonanych ekranów ferromagnetycznych.
8. Celowym wydaje się zbadanie udziału ziemskiego pola magnetycznego w szczelinie, w której znajduje się falowód.

Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że w hallotronowym układzie pomiarowym zabezpieczenia kierunkowego ze zwiększoną czułością napięciową można uzyskać dostatecznie wysoki sygnał wyjściowy przy rezystancji przejścia R_p dochodzącej do 10 k Ω , jednak wykorzystanie takiego rozwiązania w zabezpieczeniu upływnościowym może być problematyczne z uwagi na to, że przy takiej wartości R_p napięcie wejściowe układu U_0 może osiągać wartości mieszczące się w zakresie wartości występujących podczas normalnych warunków eksploatacyjnych.

7. PODSUMOWANIE

Zastosowanie cewek Rogowskiego w konfiguracji analogicznej do układu Holmgrena pozwala osiągnąć czułości nie gorsze niż w układzie z tradycyjnymi przekładnikami prądowymi.

Czujniki Halla zaś są predysponowane do zastosowań w czułych kierunkowych zabezpieczeniach ziemnozwarciowych ze względu na możliwość uzyskania bezpośredniego sygnału pomiarowego, którego znak mówi o strefie zwarcia.

Wstępne analizy i badania dowodzą, że zabezpieczenie rozwiązane w zaproponowany, w ramach projektu, sposób może wykrywać zwarcia doziemne wysokooporowe w szerszym zakresie wartości rezystancji przejścia niż dotychczas znane i eksploatowane zabezpieczenia.

Otrzymane wyniki pozwolą na znaczną modernizację rozdzielnic energetycznych średniego i niskiego napięcia w zakresie zastosowania nowej generacji przetworników. Spowoduje to miniaturyzację, wzrost niezawodności i obniżenie kosztów wytwarzania.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2008 jako projekt rozwojowy nr R02 039 02.

Literatura

1. Projekt badawczo-rozwojowy nr R02 039 02: Przetworniki pola magnetycznego w układach sumujących wraz z układami pomiarowymi do zastosowań w bardzo czułych zabezpieczeniach oraz do pomiaru energii w systemach energetycznych.
2. Lisowiec A., Szkolka S.: Parametry przekładników pola magnetycznego pracujących w układzie sumacyjnym. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 02/2008.
3. Szkolka S., Wiśniewski G., Fijałkowski Z., Lisowiec A.: Filtr składowej zerowej prądu z cewką Rogowskiego w środowisku prądów odkształconych. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 2008, Nr 7-8.
4. Lisowiec A., Dumala J.: Zabezpieczenie ziemnozwarciowe z cewkami Rogowskiego pracującymi w układzie sumacyjnym. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 2008, Nr 7-8.

Recenzent: prof. dr hab. Bogdan Miedziński

NEW GENERATION MAGNETIC FIELD TRANSDUCERS IN EARTH-FAULT PROTECTION SYSTEMS OF MINING POWER ENERGY LINES

The results of tests of the magnetic field transducers (in a form of Rogovski coils) and Hall Effect sensors used in earth-fault protection systems have been presented in the paper.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНЕТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ПРЕДОХРАНЕНИЯХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ШАХТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Представлены результаты исследований преобразователей магнетического поля (в виде катушек Роговского) и преобразователей Холла в системах предохранений короткого замыкания на землю.