

Adam MAREK  
Politechnika Śląska, Gliwice

## WPLYW PRZEKSZTAŁNIKA NA PRACĘ CENTRALNYCH ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH W DOŁOWYCH SIECIACH NISKIEGO NAPIĘCIA

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono wpływ przekształtnika bezpośrednio załączonego do sieci kopalnianej niskiego napięcia na pracę centralnych zabezpieczeń upływowych. Wykazano konieczność stosowania dwubiegunowego członu pomiaru prądu. Wykazano zmniejszoną przydatność stosowania źródła stałonapięciowego w przypadku podwójnego doziemienia. Przedstawiono możliwość usunięcia tej niedogodności przez zastosowanie przemiennych napięć pomiarowych o kształcie trójkątnym lub prostokątnym.

## INFLUENCE OF A CONVERTER OPERATING IN A MINING LOW VOLTAGE SYSTEMS ON A CENTRAL LEAKAGE CURRENT PROTECTION

**Summary.** An influence of the converter directly connected to a mining low voltage system on the operation of the central leakage current protection was described in referee. Necessity of a dipolar current measurement unit was pointed out. Decreased usability of applying direct voltage in a case of a double grounding was proved. Possibility of removing this inconvenience using alternating measurement voltage in a shape of triangular or rectangular was shown.

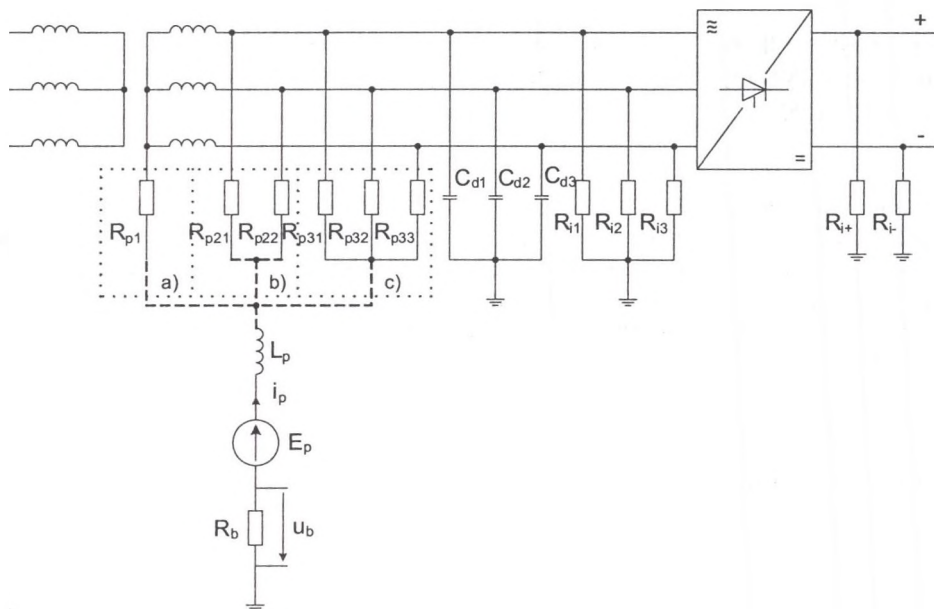
### 1. Wprowadzenie

W dołowych sieciach niskiego napięcia wymagane jest stosowanie centralnych zabezpieczeń upływowych. Zabezpieczenia te budowane są jako jednoparametrowe (rezystancja izolacji doziemnej) lub wieloparametrowe (mierzone są dodatkowo np. pojemność doziemna oraz napięcie zerowe). Zabezpieczenia te zasadniczo przeznaczone są do kontroli sieci, do których nie są załączone przemienniki lub przekształtniki.

Zastosowanie przekształtników wpływa na pracę klasycznych zabezpieczeń upływowych niskiego napięcia. Przykładowy (uproszczony) schemat ideowy klasycznego zabezpieczenia upływowego, w obwodzie którego zastosowano przekształtnik sterowany, przedstawia rys. 1. Na schemacie przedstawiono trzy sposoby sprzęgania układu pomiarowego z siecią:

- przez rezystor dołączony do punktu zerowego transformatora (rezystor  $R_{p1}$ ),
- międzyfazowe (rezystory  $R_{p21}$ ,  $R_{p22}$ ),
- trójfazowe (rezystory  $R_{p31}$ – $R_{p33}$ ).

Rozwiązanie pierwsze jest najkorzystniejsze w przypadku, kiedy dostępny jest punkt zerowy transformatora oraz kiedy mierzony jest jeden parametr – rezystancja doziemna. W przypadku symetrii sieci moc wydzielana na rezystorze jest niewielka. Rozwiązanie drugie może być stosowane w przypadku zabezpieczeń kilkuparametrowych (wtedy zamiast rezystorów stosowane są impedancje). Układ ten charakteryzuje się tym, że na jego wyjściu pojawia się duża składowa przemienna (połowa napięcia fazowego). Układ ten może być stosowany w układach jednofazowych i prądu stałego. Rozwiązanie trzecie charakteryzuje się tym, że dla symetrycznych obciążeń doziemnych składowa przemienna w punkcie neutralnym jest równa zero. Niestety, układ ten pobiera o 1/3 większą moc niż układ drugi.



Rys. 1. Schemat ideowy zabezpieczenia ziemnozwarciowego  
Fig. 1. Schematic diagram of the ground-fault protection

Napięcie pomocnicze  $E_p$  przez filtr dolnoprzepustowy, oparty na dławiku  $L_p$ , dołączone jest do jednego ze wspomnianych układów sprzęgających. Elementami wpływającymi na pracę zabezpieczenia są: pojemności doziemne ( $C_{d1} - C_{d3}$ ) oraz rezystancje doziemne: sieci prądu przemiennego ( $R_{i1} - R_{i3}$ ) oraz sieci prądu stałego ( $R_{i+}, R_{i-}$ ). Sygnałem wyjściowym układu jest prąd obwodu pomiarowego  $I_p$  mierzony pośrednio przez pomiar spadku napięcia na rezystorze  $R_b$ . Rezystancję zastępczą doziemienia wyznacza się metodą techniczną bądź w układzie omomierza szeregowego. Korzystniejsza i dokładniejsza jest metoda techniczna pomiaru rezystancji doziemnej (wykorzystuje się metodę poprawnie mierzonego prądu).

$$R_i = \frac{E_p}{I_p} - (R_p + R_b) \quad (1)$$

## 2. Analiza pracy zabezpieczeń w sieci z przekształtnikami

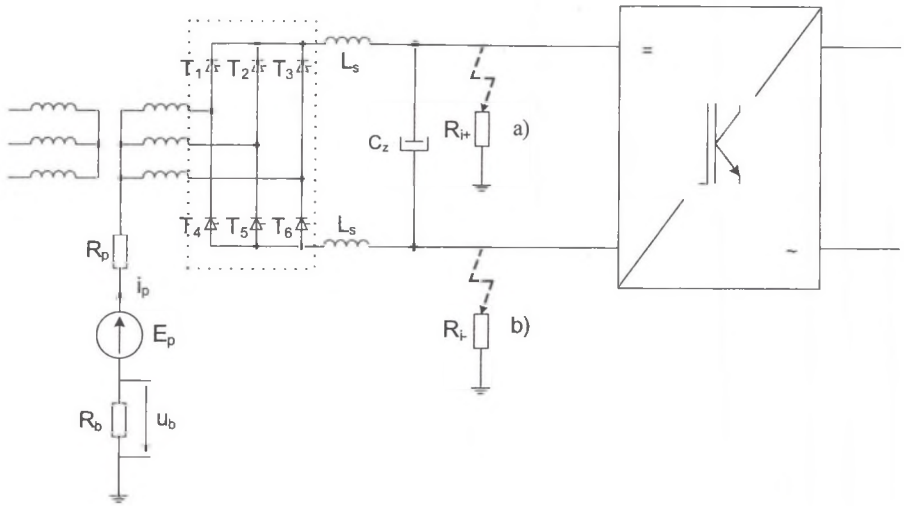
W niniejszym referacie przeanalizowano pracę zabezpieczenia ziemnozwarciowego dla przypadku, w którym do sieci bezpośrednio załączono przemiennik częstotliwości. Przemiennik częstotliwości (od strony sieci zasilającej) załączony jest przez przekształtnik AC/DC, który może być zrealizowany w oparciu o mostek diodowy, tyrystorowy lub mostek diodowo – tyrystorowy. Rysunek 2 przedstawia schemat zabezpieczenia sieci niskiego napięcia, w której został zastosowany przemiennik częstotliwości. Z punktu widzenia działania zabezpieczenia krytyczne są rezystancje doziemne obwodu prądu stałego ( $R_{i+}, R_{i-}$ ). Dla prądu ciągłego w obwodzie stałoprądowym:

$$U = U_{d0} \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

gdzie:

$U_{d0}$  – napięcie wyjściowe przekształtnika dla  $\alpha = 0$ ,

$\alpha$  – kąt opóźnienia wyzwalania tyrystorów.



Rys. 2. Schemat ideowy zabezpieczenia ziemnozwarciowego w przypadku zastosowania przemiennika częstotliwości

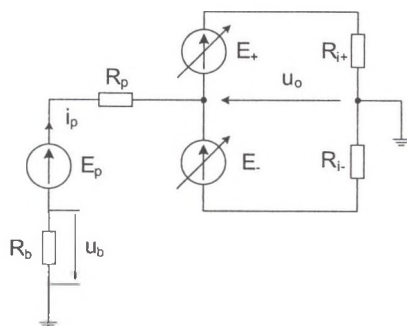
Fig. 2. Schematic diagram of the ground-fault protection in a case of using frequency converter

Napięcie wyjściowe przekształtnika jest sumą dwóch napięć wytworzonych przez grupy katodową ( $T_1 - T_3$ ) i anodową ( $T_4 - T_6$ ). W przypadku przekształtników diodowych i tyrystorowych (sterowanych symetrycznie) napięcia między zaciskami „+” i „-” przekształtnika a punktem neutralnym transformatora są równe połowie wartości  $U$ . W związku z tym prąd  $I_p$ :

$$I_p = \frac{E_p \pm \frac{U}{2}}{R_p + R_b + R_{i(+/-)}} \quad (3)$$

Na podstawie powyższej zależności można stwierdzić, że wartość prądu pomiarowego  $I_p$  w przypadku pojedynczego doziemienia na szynach obwodu prądu stałego jest kilkakrotnie większa niż wartość prądu doziemienia w obwodzie prądu przemiennego (dla tej samej wartości rezystancji doziemienia). Dodatkowo, w przypadku doziemienia bieguna ujemnego kierunek prądu ulega zmianie. W nowych zabezpieczeniach ziemnozwarciowych sieci kopalnianych obniża się wartość siły elektromotorycznej  $E_p$  do 20 – 30V. W związku z tym wzrost prądu jest jeszcze większy. Opisane zjawisko powoduje, że zabezpieczenie zadziała nie dla wartości nastawczej 15 (30) k $\Omega$ , lecz dla znacznie większej rezystancji i to pod warunkiem, że przewidziano dwubiegunowy pomiar prądu  $I_p$ . W przypadku natomiast podwójnego doziemienia w obwodzie prądu stałego sytuacja jest nieco inna. Rysunek 3

przedstawia schemat zastępczy układu dla przypadku podwójnego doziemienia w obwodzie stałoprądowym.



Rys. 3. Schemat zastępczy dla przypadku podwójnego doziemienia w obwodzie stałoprądowym  
Fig. 3. Schematic diagram of a double grounding in the dc circuit

W układzie z rys. 3 za krytyczną można uznać sytuację, w której prąd pomiarowy  $I_p$  (dla dowolnych rezystancji doziemnych) jest równy zero. Sytuacja taka wystąpi w przypadku, gdy napięcie w przekątnej  $U_o$  jest równe napięciu  $E_p$ :

$$U_o = E_- - \frac{E_+ + E_-}{1 + \frac{R_{i+}}{R_{i-}}} = E_p \quad (4)$$

W stałoprądowych układach zabezpieczeń ziemnozwarciowych odnotowano dosyć szeroki przedział napięć  $U_o$ , w przypadku których zabezpieczenie nie działa. Dotyczy to szczególnie sytuacji, gdy wartość napięcia  $U_o$  zawiera się w przedziale  $(0,1 - 1,9) E_p$ . Stwierdzono także przypadek, że użyte zabezpieczenia działają tylko dla jednego kierunku przepływu prądu  $I_p$ .

Rozwiązaniem problemów związanych z wielokrotnym doziemieniem jest zastosowanie przemiennego napięcia pomocniczego  $E_p$ . Jako napięcia pomocnicze mogą być wykorzystane napięcia o kształtach: trójkątnym i prostokątnym. Przykładem zabezpieczenia wykorzystującego przebieg trójkątny napięcia pomocniczego jest zabezpieczenie RRgFx firmy ZEG, zaś przykładem zabezpieczenia wykorzystującego napięcie pomocnicze o przebiegu prostokątnym może być zabezpieczenie IRDH275(B) firmy Bender. Charakterystyczną cechą obu zabezpieczeń są względnie duże opóźnienia zadziałania zabezpieczeń wynoszące kilka sekund. Wartość rezystancji doziemnej (dla prostokątnego napięcia pomocniczego) określa relacja:

$$R_i = \frac{2 \cdot E_p}{I_{p+} - I_{p-}} - (R_p + R_b) \quad (5)$$

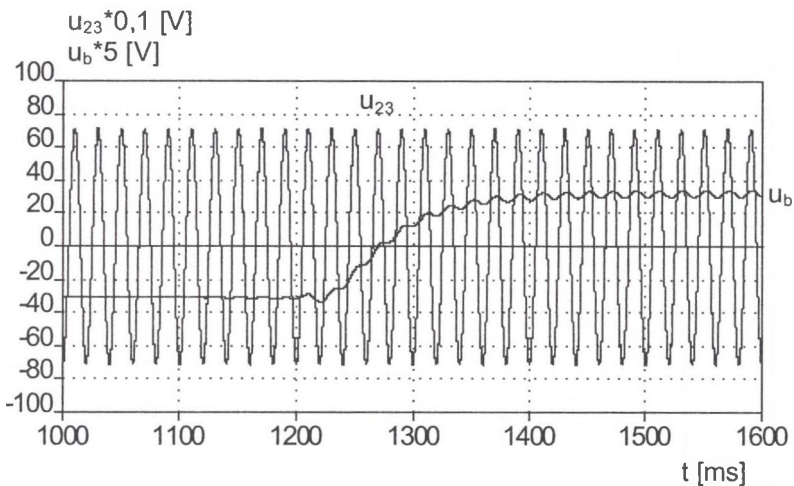
gdzie:

$E_p$  – amplituda prostokątnego napięcia pomiarowego,

$I_{p+}$ ,  $I_{p-}$  – wartość ustalona prądu  $I_p$  dla (odpowiednio) dodatniej i ujemnej wartości napięcia  $E_p$ .

### 3. Badania symulacyjne

Dla potwierdzenia wykonanej analizy przeprowadzono badania symulacyjne przedstawionych rozwiązań. Badania, w omawianych układach energoelektronicznych, zostały wykonane za pomocą programu symulacyjnego TCad. W układzie symulacyjnym rezystancja  $R_b$  została zbocznikowana pojemnością, tworząc w ten sposób człon inercyjny (w celu zmniejszenia wpływu napięć zakłócających). Na rysunku 4 przedstawiono wyniki symulacji dla przypadku podwójnego doziemienia w sieci 500 V zasilającej przekształtnik. Przyjęto następujące parametry:  $E_p = 30$  V,  $R_p = 60$  k $\Omega$ ,  $R_{i-} = 800$  k $\Omega$ ,  $R_{i1} = 15$  k $\Omega$ .

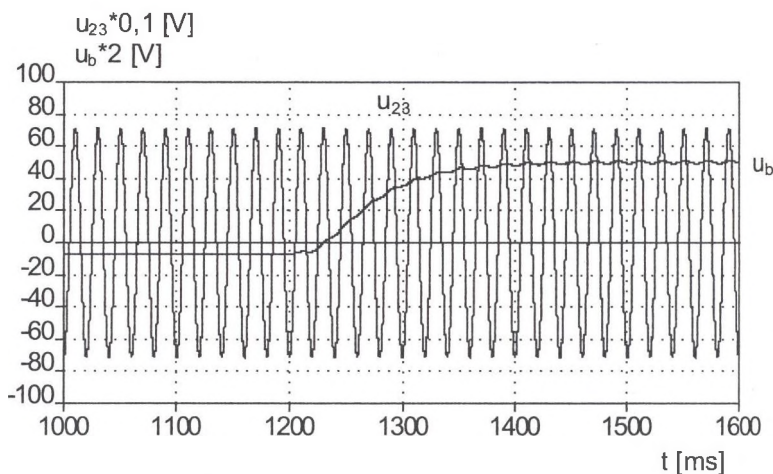


Rys. 4. Przebiegi napięcia międzyprzewodowego  $u_{23}$  oraz czujnika prądu  $u_b$  dla podwójnego doziemienia najpierw w obwodzie prądu stałego, a następnie w obwodzie prądu zmiennego i dla  $E_p = 30$  V

Fig. 4. Waveforms of the line voltage  $u_{23}$  and current sensor voltage  $u_b$  in a case of a double grounding first in the dc circuit and then ac circuit for  $E_p = 30$  V

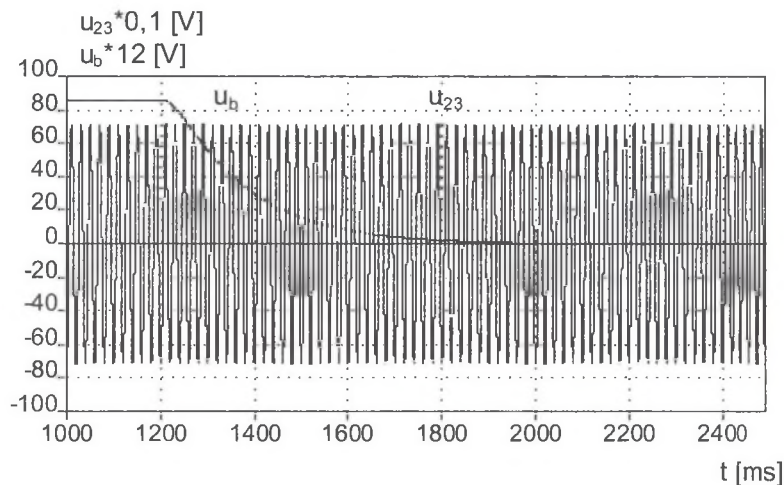
Z wyliczonych wyników wynika, że dla założonych warunków napięcie wyjściowe członu pomiarowego zabezpieczenia osiąga takie same wartości: dla 800 k $\Omega$  rezystancji doziemnej w obwodzie prądu stałego oraz 15 k $\Omega$  w przypadku uziemienia w obwodzie prądu przemiennego.

Rysunek 5 przedstawia wyniki symulacji wykonanych dla tych samych parametrów przy napięciu  $E_p = 100$  V (pozostałe parametry pozostały bez zmian).



Rys. 5. Przebiegi napięcia międzyprzewodowego  $u_{23}$  oraz czujnika prądu  $u_b$  dla podwójnego doziemienia najpierw w obwodzie prądu stałego, a następnie w obwodzie prądu zmiennego i dla  $E_p = 100$  V

Fig. 5. Waveforms of the line voltage  $u_{23}$  and current sensor voltage  $u_b$  in a case of a double grounding first in the dc circuit and then ac circuit for  $E_p = 100$  V



Rys. 6. Przebiegi napięcia międzyprzewodowego  $u_{23}$  oraz czujnika prądu  $u_b$  dla podwójnego doziemienia w obwodzie prądu stałego i  $E_p = 30$  V

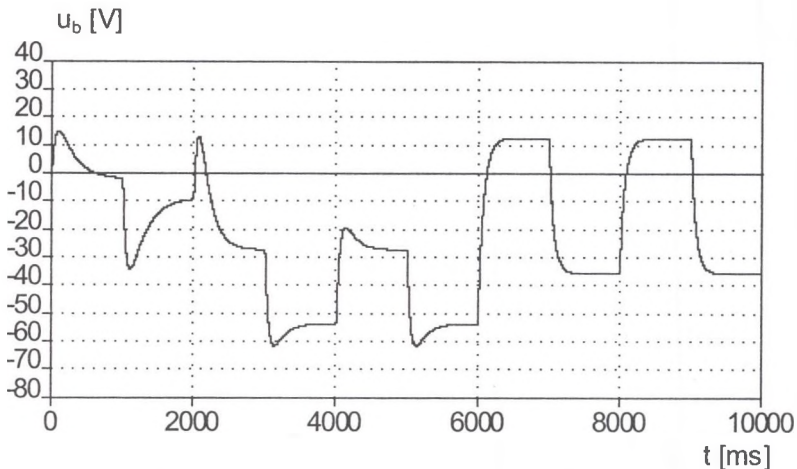
Fig. 6. Waveforms of the line voltage  $u_{23}$  and current sensor voltage  $u_b$  in a case of a double grounding in the dc circuit for  $E_p = 30$  V

Z przebiegów pokazanych na rysunku 5 wynika, że zwiększenie napięcia pomocniczego  $E_p$  doprowadziło do zasadniczego zwiększenia wartości sygnału w członie pomocniczym w sytuacji wystąpienia doziemienia w obwodzie prądu zmiennego.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki symulacji dla przypadku podwójnego doziemienia w obwodzie prądu stałego. Symulację rozpoczęto od stanu doziemienia szyny dodatniej przez rezystor  $600\text{ k}\Omega$ , a po  $1,2\text{ s}$  zasymulowano pojawienie się doziemienia szyny ujemnej przez rezystor  $500\text{ k}\Omega$ . (Napięcie  $E_p = 30\text{ V}$ , rezystancja  $R_p = 60\text{ k}\Omega$ .)

Z przebiegu napięcia wyjściowego widać, że sygnał wyjściowy zabezpieczenia po drugim doziemieniu osiągnął wartość zerową.

Na rysunku 7 pokazano wyniki symulacji przy zastosowaniu napięcia  $E_p$  o przebiegu prostokątnym ( $100\text{ V}$ ). Otrzymany kształt przebiegu napięcia wyjściowego potwierdza poprawność działania tej metody pomiarowej.



Rys. 7. Przebiegi czujnika prądu  $u_b$  dla podwójnego doziemienia w obwodzie prądu stałego przy zastosowaniu napięcia prostokątnego  $E_p = 100\text{ V}$

Fig. 7. Waveforms of the current sensor voltage  $u_b$  in a case of a double grounding in the dc circuit for rectangular voltage  $E_p = 100\text{ V}$

#### 4. Wnioski

Zastosowanie centralnych zabezpieczeń zbudowanych w oparciu o stałe napięcie pomocnicze  $E_p$  w sieciach, w których bezpośrednio załączone są przekształtniki, jest dyskusyjne. W tych bowiem warunkach:

- występuje nadmierna czułość zabezpieczenia przy pojedynczym doziemieniu w obwodach stałoprądowych, co może być powodem niepotrzebnych wyłączeń sieci,
- może wystąpić brak reakcji zabezpieczenia w przypadku podwójnych doziemień w obwodach stałoprądowych,



- człon pomiarowy powinien mierzyć prąd dla obu kierunków przepływu prądu,
- zastosowanie stałego napięcia pomiarowego umożliwia uzyskanie małego czasu reakcji zabezpieczenia.

Sieci, do których dołączone są bezpośrednio przekształtniki, powinny być wyposażone w zabezpieczenia upływowe zawierające napięcia pomiarowe  $E_p$  o kształcie prostokątnym lub trójkątnym. Niestety, zastosowanie takich napięć pomocniczych wymusza powstanie stanu nieustalonego. W związku z tym wymagane jest zastosowanie źródła o małej częstotliwości. Częstotliwość źródła napięcia pomocniczego  $E_p$  z reguły nie przekracza 0,5 Hz.

## BIBLIOGRAFIA

1. Praca naukowo-badawcza NB-257/RG1/76: Badanie struktury i charakteru zakłóceń oraz optymalizacja systemów zabezpieczeń ziemnozwarciowych, Gliwice 1979 (niepublikowana).
2. Murray J.: Application and Operation of Insulation Monitors in Unearthed (floating-IT) Rail Signal Power Systems. Power Distribution for Signalling Systems, 2007. The IET Seminar on Page(s): 167 – 184, 2007.
3. Sznura R.: Ochrona ziemnozwarciowa w górniczych sieciach niskiego napięcia – zabezpieczenia upływowe typu RRgFx/M. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 8, str. 8 -12, Katowice 2003.
4. Układ elektryczny zabezpieczenia upływowego. Opis patentowy PL 195344.
5. Method and apparatus for insulation monitoring in unearthed DC and AC networks. Opis patentowy EP 0 654 673 B1.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński