

A. PAWŁOWSKI, J. SŁUPSKI
Zakłady Energetyczne
Okręgu Południowego
w Katowicach

ZABEZPIECZENIA ODLEGŁOŚCIOWE TRANSFORMATORÓW

Jako zabezpieczenia transformatorów od zwarć zewnętrznych i rezerwowe jednocześnie - do niedawna stosowane były wyłącznie zabezpieczenia nadprądowe zwłoczne. Jednakże w miarę wzrostu mocy zwarciowych stale zaostrzały się wymagania co do dopuszczalnego czasu trwania zwarcia i to nawet dla zabezpieczeń rezerwowych. Nie udało się więc utrzymać zabezpieczeń nadprądowych jako rezerwowych dla ważnych transformatorów tym bardziej, że jeszcze w wielu rozdzielniach stanowią one jedyne zabezpieczenia wyłączające transformatory przy zwarciach na szynach zbiorczych.

W ZEOPd od kilku lat, dla transformatorów o górnym napięciu 400 i 220 kV oraz dla transformatorów blokowych, stosuje się w tym charakterze zabezpieczenia odległościowe. Dostępne obecnie u nas przekaźniki odległościowe przeważnie produkcji firmy BBC, dostosowane do linii przesyłowych, jako zabezpieczenia transformatorów narażone są dodatkowo na niekorzystny wpływ szeregu czynników. Daje się to odczuć szczególnie dotkliwie na połączeniu linii z transformatorem, urządzeń o różnym charakterze oporności zastępczych. Transformator powinien być wyposażony w zabezpieczenia odległościowe po obydwu stronach, jeżeli wymagania w zakresie skrócenia czasu trwania zwarcia mają być spełnione. Taki zestaw zabezpieczeń jest dość kosztowny, konieczne jest więc pełne wykorzystanie jego możliwości.

W ZEOPd wprowadza się szereg zmian w typowych przekaźnikach odległościowych w celu dostosowania ich do pracy na transformatorach. Zmia-

ny obejmują zarówno układ połączeń zabezpieczenia jak i metody doboru nastawień.

Doświadczenia uzyskane w tej dziedzinie są przedmiotem przedstawionego opracowania.

1. Analiza warunków działania zabezpieczenia odległościowego zainstalowanego na transformatorze

Analizę przeprowadzono dla transformatora 220/110 kV 160 MVA produkcji firmy ELTA oraz przekaźnika odległościowego typu L produkcji BBC. Takie urządzenia stanowią typowe wyposażenie sieci krajowej.

Tablica 1

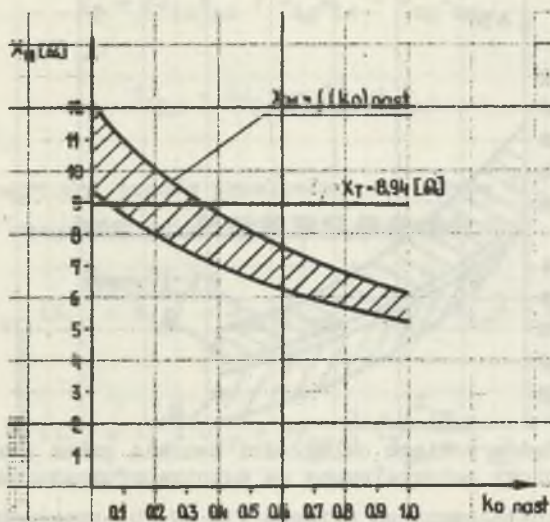
Reaktancja zastępcza autotransformatora w Ω/f

	Składowa zgodna			Składowa zerowa	
	X_{lg}	X_{ls}	X_{ld}	X_{og}	X_{os}
Mierzona od strony 220 kV	39,6	- 6,80	73,0	33,8	1,5
Mierzona od strony 110 kV	10,8	- 1,86	19,9	9,2	0,4
X_{lg}	- reaktancja dla składowej zgodnej strony 220 kV				
X_{ls}	- " " " " " 110 kV				
X_{ld}	- " " " " " 10,5 kV				
X_{og}	- " " " " zerowej strony 220 kV				
X_{os}	- " " " " " 110 kV				

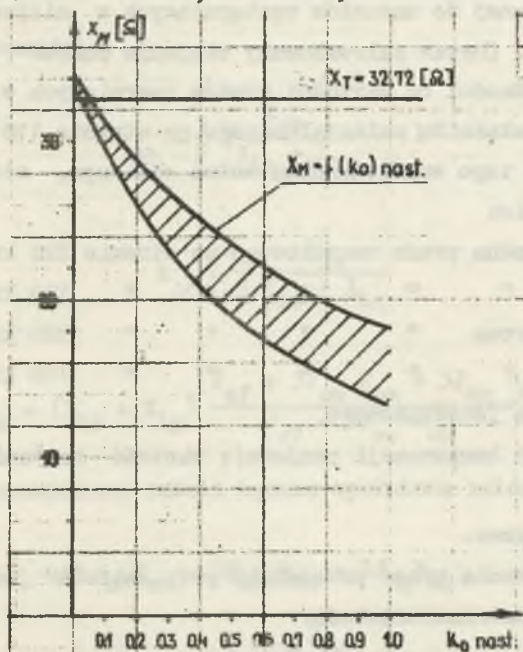
1.1. Pomiar odległości zwarcia jednofazowego

Wykorzystując dane z tablicy 1, przeprowadzono obliczenia zasięgu członu pomiarowego CM zabezpieczenia odległościowego zainstalowanego na transformatorze dla zwarcia jednofazowego. Obliczenia wykonano dla sześciu stacji rozdzielczych o różnych wartościach prądów zwarciovych. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie na rys. 1, 2, 3.

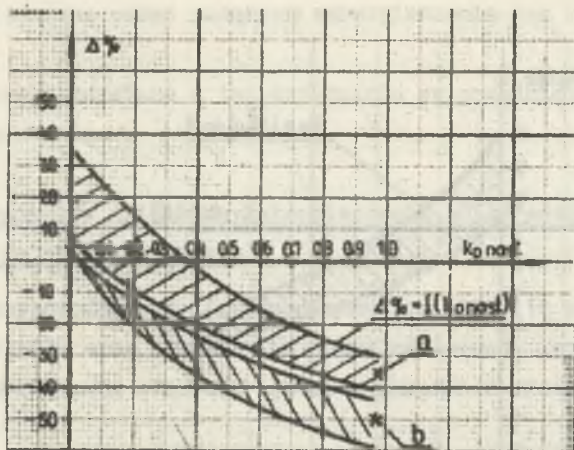
Jak widać z tych wykresów dla uzyskania prawidłowego pomiaru odległości zwarcia jednofazowego, konieczny jest dobór wartości współczyn



Rys. 1. Pomiar odległości zwarcia przez czoło pomiarowy CM w zależności od nastawionego na przełączniku k_0 . Przełącznik zainstalowany po stronie 110 kV, zwarcie po stronie 220 kV



Rys. 2. Pomiar odległości zwarcia przez czoło pomiarowy CM w zależności od nastawionego k_0 . Przełącznik zainstalowany po stronie 220 kV, zwarcie po stronie 110 kV



Rys. 3. Wykres błędów pomiaru odległości zwarcia przez przełącznik odległościowy zainstalowany na autotransformatorze

a) przełącznik zainstalowany po stronie 110 kV, b) przełącznik zainstalowany po stronie 220 kV

nika k_0 , dostosowanej do warunków występujących w miejscu zainstalowania przełącznika. Obszar zakreskowany obejmuje zakres zmienności $X_M = f(k_0)$ w zależności od wartości prądów zwarciovych w rozważanych stacjach. Dla przełącznika zainstalowanego po stronie 110 kV autotransformatora wartość tego współczynnika można obliczyć, stosując niżej podane wzory, gdzie:

J_{lg} - składowa zgodna prądu zwarciovego po stronie 220 kV

J_{ls} - " " " " " " 110 kV

J_{og} - " zerowa " " " " 220 kV

J_{os} - " " " " " " 110 kV

J_{zf} - prąd zwarcia jednofazowego

k_{on} - współczynnik kompensacji prądowej; wartość nastawiona w przełączniku

U_f - napięcie fazowe.

Reaktancja mierzona przez przełącznik przy zwarciu jednofazowym po stronie 220 kV autotransformatora:

$$X_M = \frac{U_f}{J_{zf} + 3J_{os} k_{on}} \quad (1)$$

$$U_f = 2J_{1s} X_{1s} + J_{1g} X_{1g} + J_{og} X_{og} \quad (2)$$

$$2J_{1s} = 2J_{1g} = J_{zf} - J_{os} \quad (3)$$

Wszystkie wartości prądów przeliczone na stronę 110 kV, gdzie jest zainstalowany rozważany przekładnik odległościowy

$$U_f = J_{zf} (X_{1s} + X_{1g}) + J_{os} (X_{os} - X_{1s} - X_{1g}) + J_{og} X_{og} \quad (4)$$

$$U_f = (X_{1s} + X_{1g}) J_{zf} + 3J_{os} \frac{1}{3} \left(\frac{X_{os}}{X_{1s} + X_{1g}} - 1 \right) + 3J_{og} \frac{1}{3} \frac{X_{og}}{X_{1s} + X_{1g}} \quad (5)$$

Wprowadzamy oznaczenia:

$$k_{os} = \frac{1}{3} \left(\frac{X_{os}}{X_{1s} + X_{1g}} - 1 \right) \quad (6)$$

$$k_{og} = \frac{1}{3} \frac{X_{og}}{X_{1s} + X_{1g}} \quad (7)$$

$$X_M = (X_{1s} + X_{1g}) \frac{J_{zf} + 3J_{os} k_{os} + 3J_{og} k_{og}}{J_{zf} + 3J_{os} k_{on}} \quad (8)$$

Pomiar będzie prawidłowy jeżeli będzie spełniona zależność:

$$3J_{os} k_{on} = 3J_{os} k_{os} + 3J_{og} k_{og} \quad (9)$$

$$k_{on} = k_{os} + \frac{J_{og}}{J_{os}} k_{og} \quad (10)$$

Oznaczając jako

$$k_{fg} = \frac{J_{og}}{J_o} \quad (11)$$

$$k_{on} = k_{os} + k_{fg} k_{og} \quad (12)$$

Analogicznie można obliczyć wartość współczynnika k_o dla przekąźnika odległościowego zainstalowanego po stronie 220 kV autotransformatora.

Stosując powyższe wzory przeprowadzono obliczenia wartości k_o dla przekąźników odległościowych zainstalowanych na autotransformatorach w sześciu poprzednio rozważanych stacjach. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 2.

Tablica 2

Zestawienie wartości k_o potrzebnych dla uzyskania prawidłowego pomiaru odległości zwarcia jednofazowego w sześciu wybranych stacjach rozdzielczych

k_o	miejsce zwarcia	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5	Nr 6
	przekąźnik po stronie 110 kV	0,67	0,20	0,11	0,25	0,26	0,36
	przekąźnik po stronie 220 kV	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04

Dla uzyskania prawidłowego pomiaru odległości zwarcia jednofazowego na linii napowietrznej w przekąźniku odległościowym potrzebne jest nastawienie k_o :

dla linii 220 kV średnio 0,6 - ponieważ $\frac{X_{oL}}{X_{1L}} = 2,8$

dla linii 110 kV średnio 0,8 - ponieważ $\frac{X_{oL}}{X_{1J}} = 3,4$

X_{oL} , X_{1L} - reaktancja linii dla składowej zerowej i zgodnej.

Jak widać wartości k_0 dla zabezpieczeń odległościowych linii i transformatora różnią się znacznie.

A zatem przekaźnik odległościowy, obejmujący swoim zasięgiem linię i transformator, nie może prawidłowo mierzyć odległości zwarcia jednofazowego na obu tych urządzeniach.

1.2. Dobór nastawień członów rozruchowych ZA

Przy obliczeniu nastawień członów rozruchowych trzeba uwzględniać maksymalne wartości prądów obciążenia i prądów wyrównawczych.

Dla zilustrowania trudności jakie występują przy doborze nastawień członów rozruchowych zabezpieczeń odległościowych transformatorów, w tabelicy 3 przedstawiono wyniki obliczeń dla wartości prądów wyrównawczych.

Przyjęte do obliczeń wartości prądu wyrównawczego są zbliżone do wartości występujących w sieci ZEOPd,

Tabela 3

Dobór nastawień członów rozruchowych

	Strona 110 kV			Strona 220 kV		
	1000	1500	2000	300	500	700
J_w [A]	1000	1500	2000	300	500	700
Z_r [Ω/F]	14,0	11,1	9,25	69,2	55,2	45,8
k_c	1,12	0,91	0,76	1,55	1,24	1,02

J_w - prąd wyrównawczy,

Z_r - impedancja rozruchowa

k_c - współczynnik czułości.

Jak wynika z tabelicy 3 dla większych wartości prądu wyrównawczego warunek czułości nie jest spełniony.

Konieczne jest wówczas - podobnie jak dla linii - zastosowanie kompaudancji członów rozruchowych lub przystawki Y_k/L wydłużającej zasięg rozruchu. Z przedstawionej na rys. 4 charakterystyki członu rozruchowego wynika, że kompaudancja skracą zasięg członów rozruchowych

w przeciwnym kierunku. Jest to szczególnie istotne dla dwukierunkowych zabezpieczeń odległościowych. Można tego uniknąć przez zastosowanie przystawki Yke/L.

2. Przegląd stosowanych układów

2.1. Zabezpieczenie odległościowe w typowym układzie

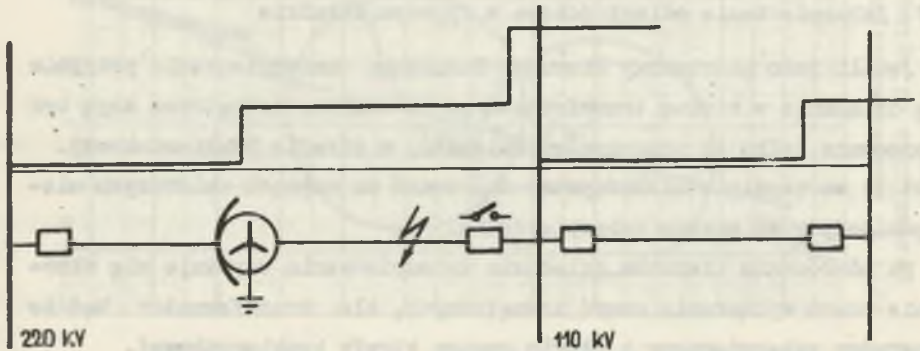
Jeżeli jako podstawowy kierunek działania zabezpieczenia przyjmie się działanie w stronę transformatora, to zwarcia zewnętrzne mogą być obejmowane tylko ze znacznym opóźnieniem, w strefie bezkierunkowej. Jest to szczególnie niekorzystne dla zwarć na szynach zbiorczych niewyposażonych we własne zabezpieczenia.

Po odwróceniu kierunku działania zabezpieczenia uzyskuje się skrócenie czasu wyłączenia zwarć zewnętrznych, ale transformator będzie rezerwowo zabezpieczony z długim czasem strefy bezkierunkowej.

Pola transformatora powinny być w całości obejmowane przez jego zabezpieczenie różnicowe. Po zastąpieniu własnego pola przez pole obejmujące (np. na czas remontu wyłącznika) główne przekładniki prądowe zostają wyłączone i gdyby do nich były przyłączone obwody zabezpieczenia różnicowego, należałoby to zabezpieczenie unieruchomić lub wprowadzić w jego układzie odpowiednie zmiany. Chcąc utrzymać w ruchu zabezpieczenie różnicowe bez konieczności wprowadzania zmian w obwodach prądowych, należałoby wyłączyć ze strefy chronionej całe pole, przyłączając obwody prądowe do przekładników przepustowych wbudowanych w transformator. Wówczas pole powinno być objęte bezzwłocznym działaniem zabezpieczenia odległościowego.

Jednak bardziej celowe wydaje się objęcie strefą działania zabezpieczenia różnicowego obydwu pól transformatora w całości, przyłączając jego obwody do głównych, wolnostojących przekładników prądowych. Na czas pracy transformatora przez pole obejmujące można by wówczas zrezygnować z zabezpieczenia różnicowego, zwłaszcza w nagłej potrzebie. Zabezpieczenia odległościowe, zwrócone po obu stronach w kierunku transformatora, zapewniłyby bezzwłocznie wyłączenie zwarć pod warunkiem wprowadzenia tutaj - podobnie jak dla linii wydłużenia pier-

wszych stref na czas około 0,3 s po załączeniu wyłącznika. Bez tego zwarcia - w polu po przeciwległej stronie transformatora w stosunku do wyłącznika, którym ten transformator jest załączony pod napięcie - zostałyby wyłączone ze znacznym opóźnieniem - rys. 6.



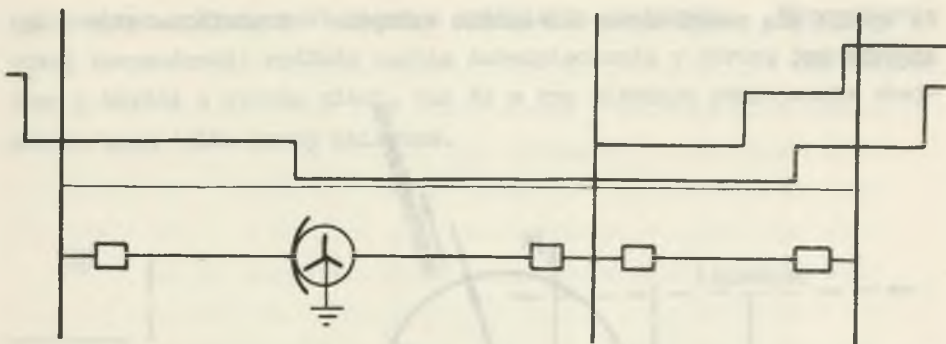
Rys. 6. Charakterystyka działania zabezpieczenia odległościowego na transformatorze podczas jednostronnego zasilania

2.2. Zabezpieczenie odległościowe o pełnej, dwukierunkowej charakterystyce działania

W ZEOPd opracowano, w oparciu o przekaźnik typu L produkcji firmy HBC, dwukierunkowe zabezpieczenia odległościowe. Zastosowano je po raz pierwszy w 1964 roku, w rozdzielni uproszczonej o układzie "H" z jednym wyłącznikiem w poprzeczce, gdzie zamiast dwóch przekaźników odległościowych - po jednym dla każdej linii - zainstalowany został jeden dwukierunkowy.

Zestaw charakterystyk działania takiego zabezpieczenia przedstawiony jest na rys. 7. Zasięg członów rozruchowych w obydwu kierunkach jest jednakowy, a długość wszystkich stref w obu kierunkach i ich opóźnienia czasowe mogą być dobierane niezależnie od siebie.

Układ taki uzyskano przez zastosowanie dodatkowego przekaźnika kierunkowego, który przez przełączenie biegunowości w obwodzie prądowym członu pomiarowego CM odwraca kierunek działania zabezpieczenia.

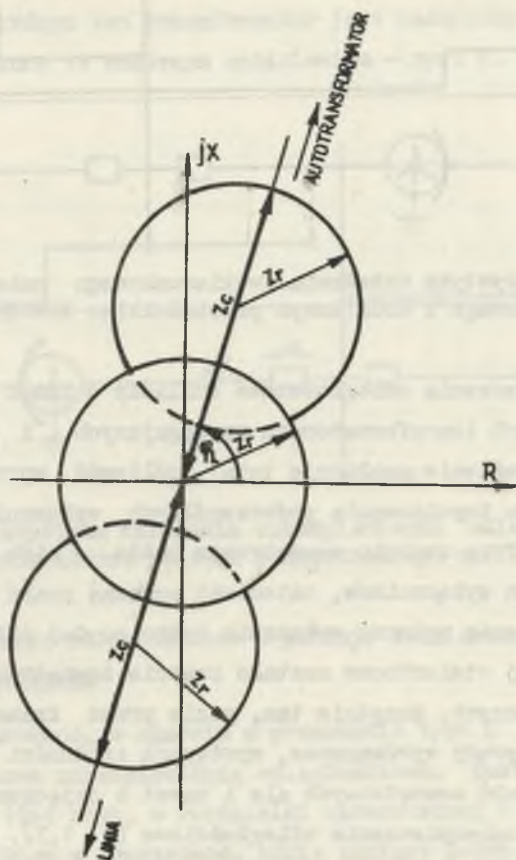


Rys. 7. Charakterystyka działania dwukierunkowego zabezpieczenia odległościowego z dodatkowym przełącznikiem kierunkowym

Takie zabezpieczenia odległościowe znalazły w ZEOPd zastosowanie również na ważnych transformatorach sprzęgających i blokowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje tutaj możliwość wprowadzenia uniwersalnego układu impulsowania poszczególnych wyłączników w polach transformatora. Przy zwarcu wewnętrznym każde z nich powoduje wyłączenie wszystkich wyłączników, natomiast podczas zwarc zewnętrznego każde zabezpieczenie wyłącza wyłącznik tylko po tej stronie transformatora, po której stwierdzone zostało zwarcie zewnętrzne, np. zwarcie na szynach zbiorczych. Wszędzie tam, gdzie przez transformator przepływają znaczne prądy wyrównawcze, występują trudności nie tylko z rezerwowaniem zwarc zewnętrznego ale i nawet z objęciem całego transformatora przez zabezpieczenie odległościowe (p. 1.3). Konieczne jest wtedy wprowadzenie kompaudancji, która w jednym kierunku wydłuża zasięg zabezpieczenia, a w przeciwnym skraca. Po wprowadzeniu kompaudancji zalety dwukierunkowego zabezpieczenia odległościowego, z pełnym zakresem charakterystyk w obu kierunkach, są poważnie uszczuplone (rys. 4).

Zasięg zabezpieczenia odległościowego można wydłużyć w pożądanym kierunku nie skracając go w kierunku przeciwnym przez zastosowanie przystawki Yke/L. Przy pomocy dwóch takich przystawek można wydłużyć zasięg zabezpieczenia odległościowego w obydwu kierunkach (rys. 8),

co wydaje się uzasadnione dla bardzo ważnych transformatorów np. 400/220 kV.

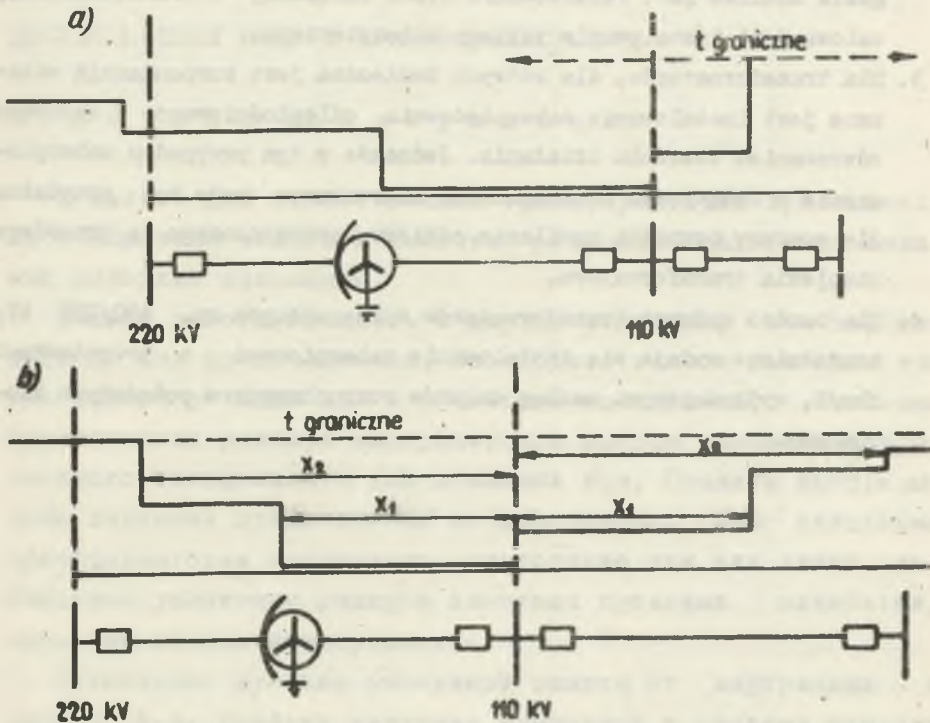


Rys. 8. Charakterystyka zasięgu dwukierunkowego zabezpieczenia odległościowego z dwiema przystawkami Y_{ke}/L

2.3. Zabezpieczenie odległościowe z kierunkiem odwracalnym po nastawionym opóźnieniu czasowym

W Zakładach Energetycznych Okręgu Dolnośląskiego zastosowano układ zabezpieczenia odległościowego, umożliwiającego uzyskanie charakterystyk działania pokazanych na rys. 9. Odwracanie kierunku działania następuje tutaj również przez przełączenie biegunowości w obwodzie prądowym członu pomiarowego CM. Przełączenia dokonuje człon

zwłoczny po upływie nastawionego opóźnienia czasowego. Wprowadzenie tutaj kompaudancji wydłuży zasięg zabezpieczenia w stronę transformatora i skróci w stronę sieci, tak że w tym kierunku praktycznie obejmowane będą tylko szyny zbiorcze.

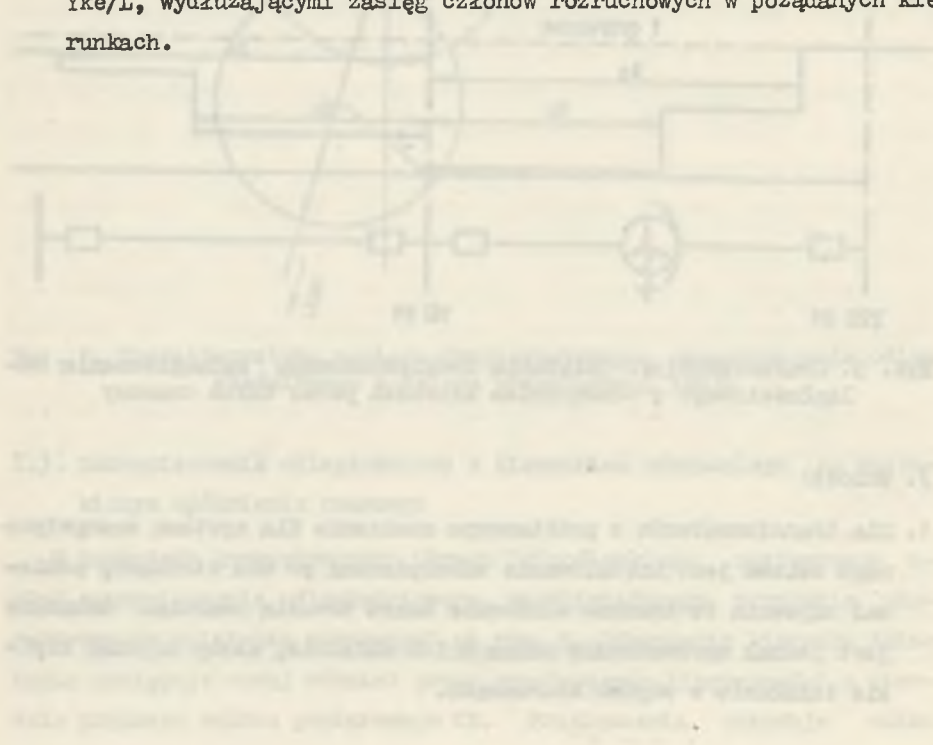


Rys. 9. Charakterystyki działania dwukierunkowego zabezpieczenia odległościowego z odwracaniem kierunku przez człon czasowy

3. Wnioski

1. Dla transformatorów o podstawowym znaczeniu dla systemu energetycznego celowe jest instalowanie zabezpieczeń po obu stronach, ponieważ zapewnia to znaczne skrócenie czasu trwania zwarcia. Wskazane jest jednak wprowadzenie zmian w ich układzie, ażeby uzyskać szybkie działanie w obydwu kierunkach.

2. Dla transformatorów, dla których nie jest konieczna kompaudancja członów rozruchowych, najbardziej odpowiednie wydaje się zabezpieczenie dwukierunkowe z pełnym zakresem charakterystyki działania w obydwu kierunkach, zwłaszcza dla transformatorów z trzecim uzwojeniem wykorzystanym do zasilania ważnego odbiorcy. Również tam, gdzie możliwe jest rezerwowanie sieci zasilanej z transformatora, celowe jest instalowanie takiego zabezpieczenia.
3. Dla transformatorów, dla których konieczna jest kompaudancja wskazane jest instalowanie zabezpieczenia odległościowego z czasowym odwracaniem kierunku działania. Jednakże w tym przypadku zabezpieczenie z dodatkowym przekaźnikiem kierunkowym może być przydatne dla poprawy pewności zasilania odbiorcy przyłączonego do trzeciego uzwojenia transformatora.
4. Dla bardzo ważnych transformatorów sprzęgających np. 400/220 kV, uzasadnione wydaje się instalowanie zabezpieczeń z przystawkami Y_{ke}/L , wykluczającymi zasięg członów rozruchowych w pożądanym kierunku.



А. ПАВЛОВСКИ, Я. СЛУИНСКИ
Энергетическое Управление Южного Округа
Катовице

ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

К о р о т к о е с о д е р ж а н и е

В Польше для ответственных трансформаторов применяется дистанционная защита в качестве резервной защиты от внешних коротких замыканий.

Защита действует здесь в других условиях, чем те, для которых она предназначена. Необходимо ввести изменения так при выборе уставок как и в системе соединений. Особенно существенная разница выступает при выборе значений коррекционного коэффициента для земляных к.з. Правила выбора для этих значений представлены на диаграммах. Для некоторых трансформаторов необходимо, аналогично как для линий, добавочное удлинение радиуса действия пусковых элементов, нпр. при помощи компаундации.

Совмещение функции резервной защиты от внутренних и внешних к.з. требует введения изменений в системе соединений. В Польше применяются два рода дистанционных защит для трансформаторов: система простейшая с перераспределением измерительных зон на две стороны (в одну сторону две зоны и в другую - одна) и система с полным диапазоном характеристики в обе стороны, требующая применения добавочного направленного реле, которое - по мнению авторов - увеличивает надежность питания потребителей, присоединенных к третьей обмотке трансформатора.

ОПИСАНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. Измерение расстояния до места к.з. при помощи измерительного элемента "СМ" в зависимости от значений уставки реле "К₀". Реле установлено на стороне 110 кв, короткое замыкание на стороне 220 кв

Рис. 2. Измерение расстояния до места к.з. при помощи измерительного элемента "СМ" в зависимости от значений уставки реле "К₀". Реле установлено на стороне 220 кв, короткое замыкание на стороне 110 кв

Рис. 3. Кривые ошибок измерения расстояния до места к.з. дистанционным реле, установленным на автотрансформаторе

а) реле установлено на стороне 110 кв

б) реле установлено на стороне 220 кв

Рис. 4. Характеристика радиуса действия пускового элемента с наличием компаундирования

Рис. 5. Характеристика радиуса действия дистанционного реле с приставкой типа Уке/L

Рис. 6. Характеристика действия дистанционной защиты трансформатора при одностороннем питании

Рис. 7. Характеристика действия двухсторонней дистанционной защиты с добавочным направленным реле

Рис. 8. Характеристика радиуса действия двухсторонней дистанционной защиты с двумя приставками типа Уке/L

Рис. 9. Характеристики действия двухсторонней дистанционной защиты с поворотом направления при помощи реле времени.

A. PAWŁOWSKI, J. ŚLUPSKI
Power Board of the Southern Region
Katowice

DISTANCE - PROTECTION OF POWER TRANSFORMERS

S u m m a r y

In Poland important transformers are provided with distance protections operating as back up ones and as external fault protections. Operating conditions of the protection differ in this case from conditions for which it was designed. Thus, there is necessity of modifications, both in settings and in connections of relay. Particularly significant changes take place in choice of correction coefficient values for earth faults. The principles of choice of these values are given in the diagrams. For certain transformers there is necessity, likewise the lines, of extra elongation of starting elements reach, e.g. by means of compounding. Combining of back up protection functions for both internal and external faults requires introducing connection changes. In Poland are being used the two distance protection systems for transformers: simpler one with measuring zones division in two directions (two zones in one, and one zone in another direction) and system with full characteristic range in both directions. The last one, requiring extra directional relay, in authors' opinion, improves supply reliability of load being connected to third winding of transformer.

FIGURES DESCRIPTIONS

- Fig. 1. Measurement of fault distance realized by measuring element CM as a function of "k" adjusted in the relay. The relay is installed on 110 kV side, the fault being on 220 kV side.
- Fig. 2. Measurement of fault distance realized by measuring element CM as a function of "k" adjusted. The relay is installed on 220 kV side, the fault being on 110 kV side.
- Fig. 3. Error curves of fault distance measurement in case of distance relay installed on auto-transformer
- a) the relay installed on 110 kV side
 - b) the relay installed on 220 kV side
- Fig. 4. Reach characteristic of starting element provided with compounding
- Fig. 5. Reach characteristic of distance relay with Yke/L attachment
- Fig. 6. Operating characteristic of distance protection of transformer during one - way energizing
- Fig. 7. Operating characteristic of double direction distance protection with extra directional relay
- Fig. 8. Reach characteristic of double - direction distance protection provided with two Yke/L attachments
- Fig. 9. Operating characteristics of double - direction distance protection with direction reversing by means of timing element.