

## **Optimalizacja nastawień zabezpieczenia różnicowego transformatora RRTC-1 na podstawie wyników dotychczasowej eksploatacji**

### **1. Wprowadzenie**

Nastawienie zabezpieczenia różnicowego transformatora powinno zapewniać obejmowanie wszystkich zwarć w transformatorze, w tym zwarć zwojowych i na wyprowadzeniach w obrębie strefy chronionej. Równocześnie zabezpieczenie nie powinno reagować na normalne zdarzenia sieciowe (załączenie transformatora, skok obciążenia itp.) i na zwarcia powstałe poza strefą chronioną. W dotychczasowej praktyce pogodzenie obu warunków było niemożliwe. Próby uczulania nastawień tak, aby obejmowały pojedyncze zwarcia zwojowe, kończyły się częstymi działaniami zabezpieczenia, które nie były związane z uszkodzeniami w strefie chronionej i przy powszechnym braku rejestratorów nie dawały się wyjaśnić. Biorąc pod uwagę, że każde działanie zabezpieczenia różnicowego wymaga dokładnego wielogodzinnego sprawdzenia stanu transformatora (załączenie napięcia na uszkodzony transformator może spowodować ogromne straty), stan taki nie dawał się utrzymać i w związku z tym podnoszono nastawienia zabezpieczenia różnicowego do poziomu, przy którym zbędne działania już nie występowały. Standardem stało się nastawianie zabezpieczenia różnicowego stosunkowo wysoko (np.: początkowy prąd rozruchowy  $I_{rr}$  na poziomie 0,5 prądu znamionowego transformatora ( $I_{nT}$ ), współczynnik hamowania  $kh = 0,5$ ). Takie nastawienie eliminowało w większości przypadków niepotrzebne zadziałania, jednak powodowało, że część zwarć zwojowych w transformatorze nie była obejmowana przez zabezpieczenie różnicowe.

Wprowadzając na rynek zabezpieczenie różnicowe RRTC-1 zalecaliśmy nastawienia w dotychczasowym standardzie. Wyposażenie zabezpieczenia RRTC-1 w rejestrator kryterialny pozwoliło zgromadzić bogaty materiał o zachowaniu się zabezpieczenia w różnych sytuacjach sieciowych. Analiza zebranego materiału wykazała, że przyjęte nastawienia są za wysokie i można je dość znacznie obniżyć.

### **2. Parametry nastawiane w zabezpieczeniu RRTC-1**

Parametry nastawiane w zabezpieczeniu różnicowym RRTC-1 można podzielić na cztery grupy:

- grupa pierwsza obejmuje parametry związane z chronionym obiektem (grupa połączeń transformatora, przekładnia transformatora, przekładnie przekładników prądowych),
- grupa druga obejmuje podstawowe parametry zabezpieczenia różnicowego (początkowy prąd rozruchowy zabezpieczenia  $I_{rr}$  i nachylenie charakterystyki stabilizacji reprezentowane przez współczynnik stabilizacji  $kh$ ),

- grupa trzecia obejmuje szczegółowe parametry zabezpieczenia RRTC-1 związane z działaniem poszczególnych algorytmów (współczynnik blokowania drugą harmoniczną, limit blokowania drugą harmoniczną, współczynnik blokowania piątą harmoniczną, limit blokowania piątą harmoniczną, współczynnik modyfikacji i limit całkowity blokowania). Parametry z tej grupy nazwane zostały „nastawieniami serwisowymi” i są dostępne do modyfikacji tylko z komputera zewnętrznego przy wykorzystaniu wersji serwisowej programu obsługi,
- grupa czwarta obejmuje nastawienia pomocnicze związane z eksploatacją zabezpieczenia (data/czas, hasło, oznaczenie przekaźnika, sposób wyświetlania pomiarów w stanie czuwania).

### **3. Nastawienia parametrów grupy pierwszej (parametrów związanych z chronionym obiektem)**

Nastawienia parametrów grupy pierwszej powinny dokładnie odpowiadać parametrom urządzeń pierwotnych w miejscu zainstalowania zabezpieczenia RRTC-1.

#### **– grupa połączeń transformatora**

W zabezpieczeniu należy nastawić rzeczywistą grupę połączeń transformatora. W przypadku gdy faza L1 wchodzi na kolumnę „a”, faza L2 na kolumnę „b”, a faza L3 na kolumnę „c” transformatora, rzeczywista grupa połączeń jest zgodna z podaną na tabliczce znamionowej transformatora. Zdarzają się jednak przypadki, że transformator jest odwrócony w stosunku do szyn, to znaczy faza L1 wchodzi na kolumnę „c”, faza L2 na kolumnę „b”, a faza L3 na kolumnę „a” transformatora. W takim przypadku dla transformatorów o grupie połączeń gwiazda-trójkąt rzeczywista grupa połączeń jest inna od podanej na tabliczce znamionowej i zmienia się według schematu podanego poniżej:

grupa połączeń na tabliczce znamionowej	rzeczywista grupa połączeń
<b>Yd11</b>	<b>Yd1</b>
<b>Yd1</b>	<b>Yd11</b>
<b>Yd5</b>	<b>Yd7</b>
<b>Yd7</b>	<b>Yd5</b>

W takim przypadku w zabezpieczeniu należy nastawić rzeczywistą grupę połączeń.

W przypadku instalowania zabezpieczenia na transformatorach o grupie połączeń gwiazda-gwiazda z dodatkowym uzwojeniem kompensującym połączonym w trójkąt należy wybierać odpowiednią grupę Yy(d).

#### **– przekładnia transformatora**

W zabezpieczeniach RRTC-1/2 dla transformatorów dwuuzwojeniowych przekładnię transformatora wprowadza się wpisując wartość prądów znamionowych (odczytanych z tabliczki znamionowej transformatora) odpowiednio dla strony WN i SN. W przypadku gdy w transformatorze istnieje regulacja przekładni, do zabezpieczenia należy wprowadzić wartość prądu znamionowego dla środkowego położenia przełącznika zaczepek (na tabliczce znamionowej środkowa wartość prądu). W sytuacji, gdy brak jest danych o prądzie znamionowym, można jego wartość dla danej strony transformatora wyliczyć ze wzoru:

$$I_{nT} = \frac{S_{nT}}{U_{nT} \cdot \sqrt{3}}$$

gdzie:

- $I_{nT}$  - prąd znamionowy transformatora danej strony
- $S_{nT}$  - moc znamionowa transformatora
- $U_{nT}$  - napięcie znamionowe transformatora danej strony

W sytuacji, gdy zabezpieczenie RRTC-1/2 jest instalowane na transformatorze trójzwojowym, w którym jedno z uzwojeń jest niewykorzystywane (istnieją takie przypadki), prądy znamionowe należy wyliczyć z powyższego wzoru przyjmując dla obu stron jednakową moc  $S_{nT}$  podaną dla górnego uzwojenia (stosunek prądów znamionowych odczytanych z tabliczki znamionowej przy różnych mocach poszczególnych uzwojeń da niewłaściwą wartość przekładni transformatora).

W zabezpieczeniach RRTC-1/3 dla transformatorów trójzwojowych przekładnię transformatora wprowadza się wpisując wartość napięć znamionowych dla poszczególnych stron. W przypadku, gdy w transformatorze istnieje regulacja przekładni, do zabezpieczenia należy wprowadzić wartość napięcia znamionowego dla środkowego położenia przełącznika zaczeptów.

#### - przekładnia przekładników prądowych

W zabezpieczeniu RRTC-1 wartość prądu znamionowego wtórnego przekładników (5A lub 1A) ustala się sprzętowo i nie można jej zmienić w gotowym zabezpieczeniu. Jeśli zdarzyłby się przypadek, że w zainstalowanych przekładnikach prądowych jest inna wartość znamionowego prądu wtórnego niż w dostarczonym zabezpieczeniu RRTC-1, należy zwrócić się do producenta o wymianę zabezpieczeń. Wartość znamionowego prądu pierwotnego przekładników prądowych wprowadza się do zabezpieczenia zgodnie z danymi technicznymi umieszczonymi na danym przekładniku.

#### 4. Nastawianie parametrów grupy drugiej (początkowy prąd rozruchowy $I_{rr}$ i współczynnik hamowania $kh$ )

##### - początkowy prąd rozruchowy $I_{rr}$

Nastawienie początkowego prądu różnicowego powinno zapewnić selektywną pracę zabezpieczenia różnicowego przy braku stabilizacji (praca transformatora na biegu jałowym lub wyłączony transformator). Z jednej strony wartość początkowego prądu rozruchowego powinna być jak najniższa, aby pewnie obejmować zwarcia pojedynczych zwoi w transformatorze (kilkanaście procent prądu znamionowego transformatora), z drugiej strony powinna być z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa odstrojona od prądów uchybowych, które mogą się pojawić w gałęzi różnicowej przy pracy transformatora na biegu jałowym lub z minimalnym obciążeniem. Rozpoznane przyczyny pojawiania się prądów uchybowych w gałęzi różnicowej niezależnie od prądu skrośnego są następujące:

- **szumy własne zabezpieczenia** – w zabezpieczeniu RRTC-1 szumy własne nie przekraczają 2% prądu znamionowego transformatora,

- **prąd biegu jałowego transformatora** – w większości transformatorów energetycznych prąd biegu jałowego nie przekracza pojedynczych procent prądu znamionowego transformatora,
- **prąd magnesujący spowodowany nadmiernym wzrostem napięcia** – sytuacja taka może wystąpić np. po gwałtownym odciążeniu w systemie. W transformatorach 110kV/SN pracujących z uziemionym punktem neutralnym uzwojenia 110kV w przypadku powstania bliskiego zwarcia doziemnego w sieci 110 kV może nastąpić podskok napięcia w fazach zdrowych, na skutek podbicia potencjału punktu zerowego uzwojeń spowodowanego przepływem przez uziemienie dużego prądu  $3I_0$ . Prąd magnesujący spowodowany nadmiernym wzrostem napięcia może osiągać wartość kilkudziesięciu procent prądu znamionowego transformatora. Prąd przemagnesowania transformatora cechuje się dużą zawartością piątej harmonicznej. W zabezpieczeniu RRTC-1 wykorzystano tą właściwość do stabilizowania rozruchu filtrem piątej harmonicznej. Odpowiednie nastawienia tej stabilizacji całkowicie eliminują niebezpieczeństwo błędnego działania zabezpieczenia w powyższym przypadku.
- **prąd spowodowany niedokładną transformacją prądów  $I_0$  przy bliskich zwarciach doziemnych w sieci 110 kV (dotyczy transformatorów 110kV/SN pracujących z uziemionym punktem neutralnym uzwojenia 110 kV)**. Wartość prądu uchybowego spowodowana niedokładną transformacją prądu  $I_0$  jest trudna do oszacowania. Jednak z uwagi na to, że w niektórych punktach sieci prąd  $I_0$  wypływający z transformatora może przyjąć wartość pięciokrotnie przewyższającą prąd znamionowy, można przyjąć, że prąd uchybowy w takim przypadku może wynosić kilkanaście procent prądu znamionowego transformatora. W zabezpieczeniu RRTC-1 wprowadzono stabilizację rozruchu od prądu  $I_0$ , co skutecznie eliminuje możliwość błędnego działania w tym przypadku.
- **prąd uchybowy spowodowany rozładowywaniem w obwodzie wtórnym energii zgromadzonej w przekładnikach prądowych nasyconych na skutek przepływu bardzo dużego prądu zwarc zewnętrznego**. Prąd ten występuje bezpośrednio po wyłączeniu zwarcia w przypadku, gdy podczas zwarcia przekładniki uległy nasyceniu. Jego wartość może osiągać w skrajnym przypadku wartość kilkudziesięciu procent prądu znamionowego transformatora. Prąd ten cechuje się bardzo małą częstotliwością (pojedyncze herce) i czasem zaniku rzędu pojedynczych sekund. Zabezpieczenie RRTC-1 jest całkowicie odporne na przepływ tego prądu.
- **prąd uchybowy pojawiający się przy doziemieniach w sieci SN w przypadku umieszczenia transformatora uziemniającego sieć SN w obrębie strefy chronionej przez zabezpieczenie różnicowe**. W ostatnim okresie pojawiły się rozwiązania, w których transformator potrzeb własnych rozdzielni SN jest umieszczany w polu SN transformatora 110kV/SN w obrębie strefy chronionej przez zabezpieczenie różnicowe. Jeśli w takim przypadku transformator potrzeb własnych jest wykorzystywany do wymuszania prądu przy doziemieniach w sieci SN (np. uziemianie przez rezystor), to każde zwarcie doziemne w sieci SN spowoduje pojawienie się w gałęzi różnicowej zabezpieczenia różnicowego prądu o wartości  $1/3$  prądu wymuszania.

Jak widać z powyższych rozważań, dla wszystkich poza ostatnim rozpoznanych przypadków zabezpieczenie RRTC-1 można nastawić tak, aby pewnie obejmowało pojedyncze zwarcia zwojowe. Jednak z uwagi na to, że brak jest szerszych doświadczeń z pracą zabezpieczeń różnicowych przy tak niskim nastawieniu początkowego prądu

rozruchowego, i w związku z tym nie ma pewności czy wszystkie przyczyny pojawiania się prądów uchybowych w gałęzi różnicowej zostały rozpoznane, zalecamy pewną ostrożność przy obniżaniu tych nastawień. W pierwszym rzędzie proponujemy obniżyć nastawienie początkowego prądu rozruchowego o połowę i następnie bacznie obserwować zachowanie się zabezpieczenia. Jeśli eksploatacja zabezpieczenia przy takim nastawieniu potwierdzi słuszność przyjętego rozumowania, możliwe będzie dalsze jego obniżanie. W związku z powyższym proponujemy w zabezpieczeniu RRTC-1 następujące nastawianie początkowego prądu rozruchowego  $I_{rr}$ :

- dla wszystkich transformatorów za wyjątkiem transformatorów, w których w obrębie strefy chronionej przez zabezpieczenie różnicowe znajduje się transformator uziemiający sieć SN

$$I_{rr} = 0,25 I_{nT}$$

- dla transformatorów, w których w obrębie strefy chronionej przez zabezpieczenie różnicowe znajduje się transformator uziemiający sieć SN

$$I_{rr} = k_b \bullet 1/3 I_{wmax}$$

gdzie:  $I_{rr}$  - początkowy prąd rozruchowy nastawiany na zabezpieczeniu

$I_{nT}$  - znamionowy prąd transformatora

$k_b$  - współczynnik bezpieczeństwa (w tym przypadku z uwagi na dokładność zabezpieczenia RRTC-1 oraz ze względu na to, że rzeczywisty prąd wymuszania jest zawsze mniejszy od maksymalnego, można przyjąć wartość  $k_b = 1,3$ )

$I_{wmax}$  - maksymalny prąd wymuszenia

- **nachylenie charakterystyki stabilizacji – współczynnik hamowania  $k_h$**

Nastawienie współczynnika hamowania powinno zapewnić selektywną pracę zabezpieczenia różnicowego przy przepływie przez transformator prądu skrośnego. Z jednej strony wartość współczynnika powinna być jak najniższa, aby pewnie obejmować zwarcia pojedynczych zwoi w transformatorze (kilkanaście procent prądu znamionowego transformatora), z drugiej strony powinna zapewniać z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa odstrojenie od prądów uchybowych, które mogą się pojawić w gałęzi różnicowej przy przepływie przez transformator prądu skrośnego spowodowanego obciążeniem lub zwarcie zewnętrznym. Przyczyny pojawiania się prądów uchybowych w gałęzi różnicowej na skutek przepływu prądu skrośnego są następujące:

- **prąd uchybowy spowodowany zmianą przekładni transformatora.** Większość transformatorów energetycznych jest wyposażona w przełączniki zacsepów umożliwiające regulację przekładni transformatora pod obciążeniem. Największy zakres regulacji występuje w transformatorach rozdzielczych 110kV/SN i może wynosić  $\pm 18\%$ . Zakładając, że w trakcie pracy transformatora przełącznik zacsepów może być ustawiony na skrajnym zacsepie, należy przyjąć, że prąd uchybowy spowodowany regulacją przekładni może dochodzić do wartości 18% prądu skrośnego,

- **prąd uchybowy spowodowany niedokładnością odwzorowania przekładni transformatora.** W zabezpieczeniach różnicowych, w których przekładnie transformatora odwzorowywano za pomocą przekładników wyrównawczych, prąd uchybowy spowodowany niedokładnością odwzorowania przekładni transformatora mógł osiągać wartość do 5% prądu skrośnego. W zabezpieczeniu RRTC-1 przekładnia transformatora jest odwzorowywana wewnątrz zabezpieczenia z dokładnością poniżej 1% (jeśli parametry grupy pierwszej są prawidłowo wprowadzone),
- **prąd uchybowy spowodowany niedokładnością zabezpieczenia.** Zabezpieczenie RRTC-1 w całym zakresie pracy liniowej (od 0,1 do 13  $I_n$ ) posiada klasę 5. Można więc przyjąć, że dla transformatorów o napięciu zwarcia  $U_z > 7\%$  (większość transformatorów energetycznych wyposażanych w zabezpieczenie różnicowe) prąd uchybowy spowodowany niedokładnością zabezpieczenia nie przekroczy 5% prądu skrośnego,
- **prąd uchybowy spowodowany błędami przekładników.** W dotychczasowej praktyce przekładniki do obwodów zabezpieczenia różnicowego dobierane są bardzo starannie, tak aby w całym zakresie możliwych prądów skrośnych pracowały w klasie. W związku z powyższym można przyjąć, że prąd uchybowy spowodowany błędami przekładników (wskazowym i kątowym) nie przekroczy wartości 5% prądu skrośnego,
- **prąd uchybowy spowodowany nasycaniem się przekładników.** Powody nasycania się przekładników są dość złożone (pozostałości magnetyczne, składowa nieokresowa prądu zwarcia, poziom obciążenia obwodu wtórnego itd.). W skrajnym przypadku nałożenia się kilku niekorzystnych zjawisk przekładnik może się zacząć nasycać już przy niewielkich prądach (1-2  $I_n$ ). W przypadku transformatora dodatkowym niekorzystnym zjawiskiem jest to, że z uwagi na różne typy przekładników poszczególnych stron, w sytuacji gdy jeden komplet zaczyna się nasycać, drugi komplet przenosi prąd bez zniekształceń. Przy głębokim nasyceniu się jednego kompletu prąd uchybowy w gałęzi różnicowej może osiągnąć wartość kilkudziesięciu procent prądu skrośnego. Bogaty materiał z dotychczasowej eksploatacji zabezpieczenia RRTC-1 wskazuje, że nawet przy głębokich nasyceniach, przyrost prądu różnicowego spowodowany nasyceniem przekładników jest całkowicie kompensowany przez filtr drugiej harmonicznej (w prądzie różnicowym spowodowanym nasycaniem się przekładników pojawia się duża zawartość drugiej harmonicznej).

Z powyższej analizy wynika, że w przypadku zabezpieczenia RRTC-1 największy wpływ na poziom współczynnika hamowania ma zakres zmian przekładni transformatora. Wpływ pozostałych czynników nie przekracza 10% prądu skrośnego, zaś wpływ najbardziej nieprzewidywalnego czynnika, nasycania się przekładników prądowych, jest całkowicie stabilizowany przez algorytm filtra drugiej harmonicznej. Jednak z tych samych powodów co w przypadku początkowego prądu rozruchowego  $I_{rr}$ , proponujemy stopniowe obniżanie współczynnika hamowania. W pierwszym kroku proponujemy obniżenie nastawienia współczynnika  $k_h$  do następujących wartości:

- dla transformatorów z regulacją przekładni  $\pm 18\%$   
 **$k_h = 0,35 \div 0,40$**
- dla transformatorów z regulacją przekładni do  $\pm 10\%$   
 **$k_h = 0,3$**

- dla transformatorów bez regulacji przekładni (np.: transformatory blokowe)  
**kh = 0,25**

*Uwaga: Ostatnio pojawiają się tendencje dobierania przekładników prądowych w polach transformatorów z uwzględnieniem w pierwszym rzędzie potrzeb pomiarowych. Efektem takiego podejścia bywa dobranie prądu znamionowego przekładników poniżej wartości prądu znamionowego transformatora. W takim przypadku, ze względu na zwiększenie się błędów i większe prawdopodobieństwo nasycania się przekładników przy zwarciach zewnętrznych, obniżanie nastawienia współczynnika hamowania (kh) może być niewskazane i należy pozostawić go na wartości 0,5. Ewentualne obniżanie nastawienia kh może być możliwe wyłącznie po wcześniejszej, wnikliwej obserwacji pracy zabezpieczenia.*

## **5. Nastawianie parametrów grupy trzeciej (nastawienia serwisowe)**

Nastawienia serwisowe są dotychczas wykonywane wyłącznie przez producenta zabezpieczenia RRTC-1 (Instytut Energetyki). Wyniki dotychczasowej eksploatacji wskazują jednoznacznie na prawidłowość przyjętych nastawień. Dodatkowo propozycja obniżenia nastawień grupy drugiej jest uwarunkowana niezmiennym zakresem działania algorytmów zależnych od nastawień serwisowych (stabilizowanie drugą harmoniczną i piątą harmoniczną). W związku z powyższym proponujemy nie zmieniać nastawień grupy trzeciej.