

Mgr inż. Hanna Dytry
Dr inż. Sylwia Wróblewska
Instytut Energetyki, Warszawa

ELEKTROENERGETYCZNA AUTOMATYKA ZABEZPIECZENIOWA GENERATORA W ZAKŁADZIE PRZEMYSŁOWYM

Przedstawiono cyfrowy zespół elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej generatora małej i średniej mocy typu CZAZ-GTM/GM. Omówiono podstawowe funkcje zabezpieczeniowe. Podano przykład układu zabezpieczeń generatora z wykorzystaniem zespołu CZAZ-GM.

ELECTROENERGETIC PROTECTION SYSTEM FOR INDUSTRIAL GENERATORS

The generator protection system type CZAZ-GTM/GM is presented. There are described the basic protection functions. The example of generator protection system with CZAZ-GM set is given.

1. WPROWADZENIE

Zadaniem Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej (EAZ) generatora jest wykrywanie jego uszkodzeń oraz nienormalnych stanów pracy w celu awaryjnego, automatycznego wyłączenia z pracy bądź sygnalizacji ostrzegawczej. Zakłócenia, na które powinny reagować elektroenergetyczne zabezpieczenia to:

- zwarcia międzyfazowe i zwarcia z ziemią uzwojenia stojana,
- zwarcia z ziemią uzwojenia wirnika i obwodów wzbudzenia,
- zwarcia zewnętrzne,
- przeciążenie stojana,
- niesymetryczne obciążenia,
- nadmierny wzrost napięcia,
- utrata wzbudzenia,
- przypadkowe załączenie pod napięcie,
- praca silnikowa,
- obniżenie częstotliwości.

Odpowiednio dobrane funkcje zabezpieczeniowe (zabezpieczenia) zapewniają reagowanie na wymienione stany nienormalne. Poza funkcjami zabezpieczeniowymi spełniającymi kryteria określone wielkościami analogowymi (prądy, napięcia, moce, impedancje) do poprawnego działania zabezpieczeń muszą być spełniane odpowiednie funkcje logiczno – czasowe.

Od cyfrowych urządzeń zabezpieczeniowych wymaga się, poza działaniem sterującym i ostrzegającym, rejestracji działania poszczególnych zabezpieczeń oraz rejestracji prądów i napięć w czasie trwania awarii i na krótko przed jej wystąpieniem.

Przedstawiony w referacie zespół typu CZAZ-GTM powstał w wyniku współpracy wytwórcy ZEG-ENERGETYKA w Tychach z Instytutem Energetyki w Warszawie. W pracach konstruktorskich wykorzystano wieloletnie doświadczenia z elektronicznymi,

analogowymi urządzeniami zabezpieczeniowymi typu ZAZ-G i ZAZ-GT, które były i są szeroko stosowane w energetyce zawodowej i przemysłowej w Polsce oraz za granicą.

2. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA ZESPOŁU EAZ

Cyfrowy zespół elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (CZAZ-GTM/GM) przystosowano do ochrony generatora małej i średniej mocy (2 MW do 30 MW), który służy do zasilania odbiorów w zakładzie przemysłowym. Zespół ten może być stosowany zarówno dla generatora bezpośrednio powiązanego z szynami zbiorczymi jak i dla generatora pracującego w bloku z transformatorem podwyższającym.

W bibliotece urządzenia zawarto pełny zakres funkcji zabezpieczeniowych, które mogą być aktywizowane przy konfiguracji układu zabezpieczeń, zgodnie z wymaganiami obiektu zabezpieczanego. Przewidziano też możliwość aktywizacji funkcji logiczno-czasowych takich jak: opóźnienie zadziałania, opóźnienie powrotu, ograniczenie czasu trwania sygnału, iloczyn funkcji, suma funkcji, negacja funkcji. Możliwe jest dowolne kojarzenie sygnałów zewnętrznych informujących o stanie pracy obiektu zabezpieczanego z sygnałami wyjściowymi poszczególnych zabezpieczeń. Uzyskuje się przez to optymalizację działania zabezpieczeń. Przewidziano możliwość programowania sterowania awaryjnego zabezpieczeń. Polega ona na przyporządkowaniu sygnałów wyjściowych poszczególnych zabezpieczeń wybranym przekaźnikom pomocniczym, sterującym łącznikami obiektu zabezpieczanego. Przewidziano też 12 programowalnych przekaźników sygnalizacyjnych. Urządzenie CZAZ-GTM/GM wyposażono w układ samokontroli poprawności działania oraz w rejestrator zakłóceń umożliwiający rejestrację wielkości analogowych oraz sygnałów pobudzeniowych i zdarzeń wszystkich zabezpieczeń.

Urządzenie CZAZ-GTM/GM przystosowano do komunikacji szeregowej z komputerem PC lub systemem nadrzędnym oraz do komunikacji autonomicznej z wykorzystaniem lokalnej konsoli operatora.

3. FUNKCJE ZABEZPIECZENIOWE

3.1. Zabezpieczenie reagujące na zwarcia międzyfazowe uzwojenia stojana generatora

Funkcję reagowania na zwarcia międzyfazowe uzwojenia stojana generatora spełnia zabezpieczenie różnicowo-prądowe generatora (87G). Przełącznik różnicowy, stabilizowany dokonuje pomiaru prądu trójfazowego w punkcie neutralnym (I_2) generatora oraz prądu trójfazowego w obwodzie wyprowadzenia mocy z generatora (I_3) wg zależności:

$$I_r = I_2 - I_3 \quad (1)$$

Charakterystykę rozruchową $I_r = f(I_h)$ określa zależność:

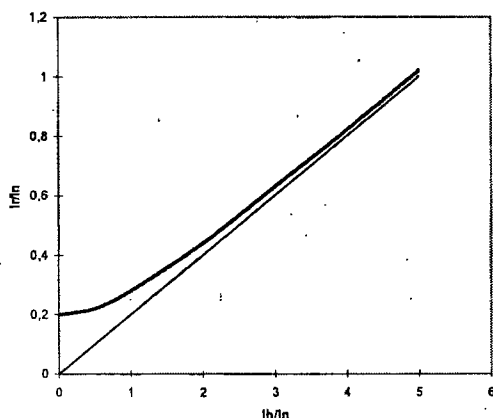
$$I_r = k_h \sqrt{\left(\frac{I_{ro}}{k_h}\right)^2 + I_h^2} \quad (2)$$

gdzie: I_r – prąd różnicowy, I_h – prąd stabilizacji

I_{ro} – różnicowy prąd rozruchowy przy prądzie stabilizacji równym zeru

k_h – współczynnik stabilizacji

Charakterystyka rozruchowa $I_r = f(I_h)$ jest hiperbolą; przedstawiono ją na na rys.1.



Rys. 1. Charakterystyka rozruchowa przekaźnika różnicowego generatora

Przekaźnik różnicowy umożliwia wykrywanie zwarc w generatorze z dużą czułością ($0,1 I_N$). Zabezpieczenie różnicowe działa bezzwłocznie ($t \leq 30\text{ms}$).

3.2. Zabezpieczenie reagujące na zwarcia z ziemią uzwojenia stojana generatora,

W przypadku generatora powiązanego bezpośrednio z szynami zbiorczymi, wielkością kryterialną wykorzystywaną do wykrywania zwarc z ziemią jest składowa zerowa prądu (I_0) mierzona w obwodzie wyprowadzenia mocy z generatora. Przekaźnik nadprądowy (51GN) mierzy prąd zerowy, za pośrednictwem przekładnika Ferranti'ego. Przekaźnik ten charakteryzuje się dużą czułością (od kilku mA) i niewrażliwością na stałą składową prądu.

W przypadku, gdy generator współpracuje z szynami zbiorczymi za pośrednictwem transformatora, wielkością kryterialną wykorzystywaną do wykrywania zwarc z ziemią uzwojenia stojana generatora jest składowa zerowa napięcia mierzona o punkcie neutralnym, bądź na zaciskach generatora.

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe rozwiązano jako zwłoczne.

3.3. Zabezpieczenie reagujące na zwarcia z ziemią wirnika i obwodów wzbudzenia generatora

Wielkością kryterialną wykorzystywaną do wykrywania obniżenia rezystancji izolacji oraz zwarc obwodów wzbudzenia generatora jest impedancja obwodów wzbudzenia względem ziemi. Człon pomiarowy zabezpieczenia włączony jest pomiędzy jeden biegun uzwojenia wirnika i szcztokę uziemiającą na wale turbozespołu. Mierzy on prąd (I_w) wymuszony w obwodzie pomiarowym zasilanym ze źródła napięcia pomocniczego (220 V, 50Hz.) oraz napięcie (U_w) między biegunem wirnika i ziemią.

Przewidziano dwa przekaźniki impedancyjne (64R.1, 64R.2), które mierzą impedancję obwodów wzbudzenia względem ziemi:

$$\underline{Z} = \frac{U_w}{I_w} \quad (3)$$

Pierwszy z nich (64R.1) działa przy obniżeniu rezystancji izolacji obwodów wzbudzenia względem ziem. Jego charakterystykę rozruchową określa zależność:

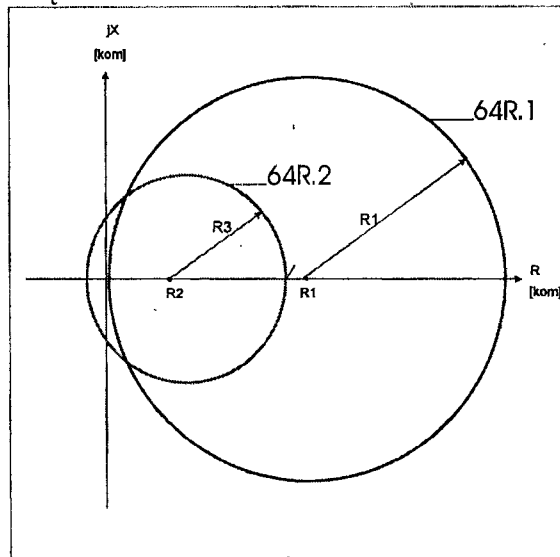
$$|\underline{Z} - R_1| < R_1 \quad (4)$$

która na płaszczyźnie impedancji zespolonej jest okręgiem (64R.1 - rys. 2) stycznym do środka układu współrzędnych. Maksymalna czułość tego przekaźnika wynosi 10 kΩ.

Drugi przekaźnik impedancyjny (64R.2) działa przy zwarciach z ziemią w obwodach wzbudzenia. Jego charakterystykę rozruchową określa zależność:

$$|\underline{Z} - R_2| < R_3 \quad (5)$$

która na płaszczyźnie impedancji zespolonej jest okręgiem (64R.2) obejmującym środek układu współrzędnych, dzięki czemu przekaźnik działa również przy zwarciach metalicznych z ziemią.



Rys.2 Charakterystyka rozruchowa zabezpieczenia ziemnozwarciowego obwodów wzbudzenia generatora

3.4. Zabezpieczenie reagujące na zwarcia zewnętrzne

Wielkością kryterialną wykorzystywaną do wykrywania zwarć zewnętrznych nie wyłączonych przez zabezpieczenia zewnętrzne, jest impedancja mierzona na zaciskach generatora. Impedancja ta maleje znacznie w przypadku zwarcia.

Przekaźnik impedancyjny (21) mierzy prąd trójfazowy (I_2) w punkcie neutralnym generatora oraz napięcie trójfazowe na jego generatora (U_1).

Zrealizowano go jako komparator amplitud impedancji mierzonej i impedancji nastawionej.

Mierzona impedancja jest ilorzem amplitud napięć oraz amplitud prądów doprowadzanych do przekaźnika.

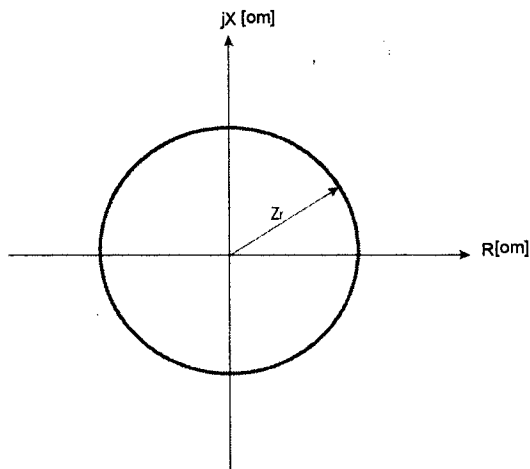
$$\underline{Z} = \frac{|U_1|}{|I_2|} \leq Z_r e^{-j\varphi} \quad (6)$$

gdzie: Z_r – promień okręgu, impedancja rozruchowa,

φ - kąt fazowy między prądem i napięciem

Charakterystyka rozruchowa przełącznika na płaszczyźnie impedancji zespolonej przedstawia okrąg ze środkiem w środku układu współrzędnych (rys. 3.). Przełącznik działa, gdy zmierzona impedancja znajdzie się w obrębie okręgu.

Zabezpieczenie impedancyjne stanowi rezerwę, przy zwarciach międzyfazowych, zarówno dla zabezpieczeń zewnętrznych, jak i dla zabezpieczenia różnicowego generatora.



Rys. 3. Charakterystyka rozruchowa przełącznika impedancyjnego

Przełącznik impedancyjny charakteryzuje się małą wartością prądu rozruchowego przy braku napięcia. Cecha ta jest szczególnie istotna dla generatorów ze statycznym układem wzbudzenia ze względu na szybkie zanikanie prądu zwarcia. Przewidziano możliwość opóźnienia działania przełącznika.

W przypadku, gdy generator wyposażono w klasyczny, maszynowy układ wzbudzenia, zabezpieczenie reagujące na zwarcia zewnętrzne można zrealizować jako nadprądowe z blokadą napięciową (51/27).

3.5. Przeciążenia uzwojenia stojana generatora

Wielkością kryterialną stwierdzania przeciążenia stojana jest prąd generatora. Przełącznik nadprądowy (51G), który mierzy prąd trójfazowy w punkcie neutralnym lub na zaciskach generatora, zrealizowano jako komparator amplitud prądów - mierzonego i nastawionego. Przewidziano możliwość opóźnienia działania przełącznika.

3.6. Niesymetryczne obciążenia

Wielkością kryterialną wykrywania niesymetrycznego obciążenia jest składowa przeciwna prądu. Przełącznik prądowy (46) stwierdza, określone przez wytwórcę generatora, dopuszczalne trwale i krótkotrwałe obciążenia niesymetryczne. Zabezpieczenie rozwiązano jako dwuczłonowe. Pierwszy człon, nadprądowy, zwłoczny – stwierdza przekroczenie wartości składowej przeciwnej prądu, będącej miarą dopuszczalnego trwale obciążenia niesymetrycznego:

$$\frac{I_{2r}}{I_{NG}} = k_1 \quad (7)$$

gdzie: I_{2r} – wartość rozruchowa przekaźnika nadprądowego,
 I_{NG} – prąd znamionowy generatora,
 k_1 – dopuszczalne trwale obciążenie niesymetryczne

Drugi człon prądowy realizuje wymaganie dopuszczalnej krótkotrwałe niesymetrii. Czas działania przekaźnika zależy od wartości prądu składowej przeciwnej wg zależności:

$$t = \frac{k_2}{\left(\frac{I_2}{I_{NG}}\right)^2} \quad (8)$$

gdzie: I_2 – zmierzona wartość składowej przeciwnej prądu,
 k_2 – dopuszczalne krótkotrwałe obciążenie niesymetryczne

3.7. Nadmierny wzrost napięcia generatora

Przekaźnik nadnapięciowy (59), który mierzy napięcie na zaciskach generatora, zrealizowany jako komparator amplitud, stwierdza nadmierny wzrost napięcia. Przewidziano możliwość opóźnienia działania przekaźnika

3.8. Utrata wzbudzenia generatora

Wielkością kryterialną stwierdzania utraty wzbudzenia generatora jest impedancja mierzona na jego zaciskach. Dla generatora bezpośrednio przyłączonego do szyn zbiorczych, charakterystyka rozruchowa przekaźnika impedancyjnego(40) realizuje na płaszczyźnie impedancji zespolonej, granicę dopuszczalnych obciążeń ze względu na stabilność współpracy z siecią (okrąg „a”, rys. 4):

$$\underline{Z} = \frac{X_d}{2} e^{-j\varphi} - j \frac{X_d}{2} \quad (9)$$

gdzie: X_d – reaktancja synchroniczna generatora, w osi podłużnej

φ – kąt przesunięcia fazowego między napięciem i prądem stojana generatora

Ze względu na wymaganie selektywnego działania przekaźnika, część okręgu obciążenia jest prosta:

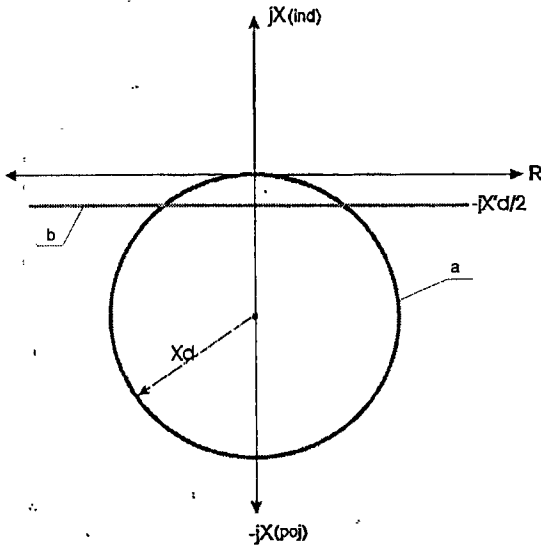
$$\underline{Z} = -j \frac{X'_d}{2} \quad (10)$$

gdzie: X'_d – reaktancja przejściowa, podłużna turbogeneratora

Omawiane zabezpieczenie wyposażono w układ logiki sumujący pobudzenia przekaźnika impedancyjnego, przez to zapewnione jest działanie zabezpieczenia w niestabilnych warunkach (kołysania mocy i impedancji) towarzyszących utracie wzbudzenia turbogeneratora.

Poza przekaźnikiem impedancyjnym, zabezpieczenie zawiera przekaźnik podnapięciowy (27), dzięki czemu uzyskuje się dwustopniowe działanie zabezpieczenia:

- z czasem krótkim kiedy utracie stabilności statycznej towarzyszy znaczne obniżenie napięcia turbogeneratora ($U=0,7 U_N$), a więc kiedy działają oba przekaźniki – impedancyjny i podnapięciowy,
 - z czasem dłuższym (np. $t=5s$), kiedy działa tylko przekaźnik impedancyjny.
- Obszar działania zabezpieczenia określa łuk okręgu (a) poniżej prostej (b).



Rys. 4. Charakterystyka rozruchowa zabezpieczenia od skutków utraty wzbudzenia generatora

3.8. Przypadkowe załączenie generatora pod napięcie

Przypadkowe załączenie pod napięcie nie wzbudzonego generatora wykrywane jest przez przekaźniki nadprądowy (51) i podnapięciowy (27). Zabezpieczenie działa wówczas, gdy w chwili poprzedzającej pojawienie się prądu generatora, napięcie na jego zaciskach było równe zero lub znacznie obniżone.

3.9. Praca silnikowa generatora

Do wykrywania pracy silnikowej generatora wykorzystano czuły komparator fazy, który stwierdza zmianę kierunku przepływu prądu czynnego generatora. Przekaźnik kierunkowo - mocowy (32R) mierzy prąd trójfazowy i napięcie na zaciskach generatora. Czułość pomiarowa przekaźnika wynosi 0,5% mocy znamionowej generatora.

3.10. Obniżenie częstotliwości

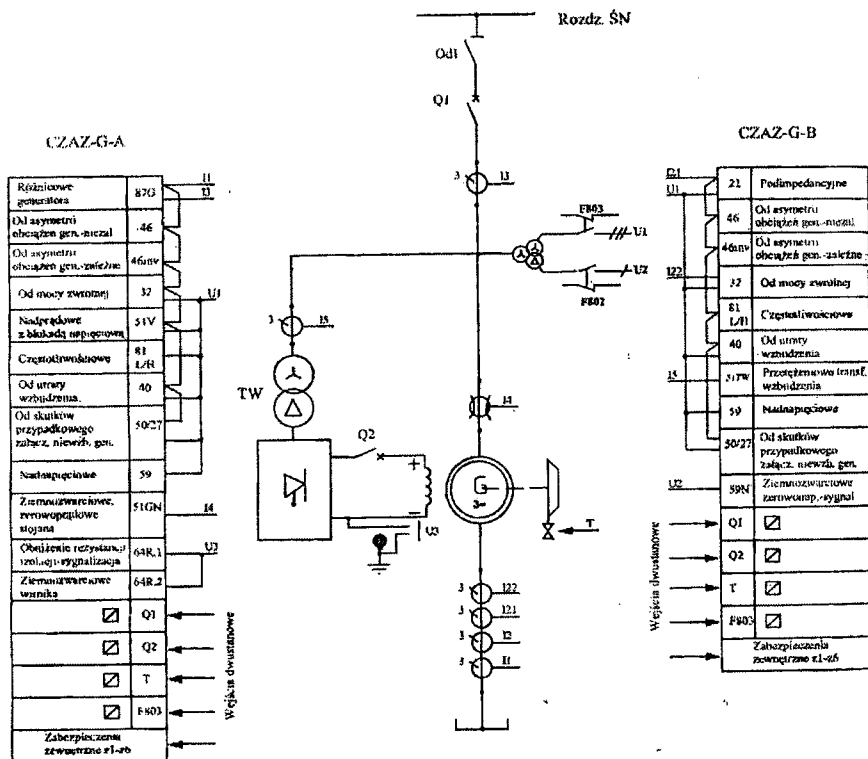
Do wykrywania nienormalnych warunków częstotliwościowych przewidziano przekaźniki pod i nad częstotliwościowe (81L, 81H).

4. PRZYKŁAD UKŁADU ZABEZPIECZEN GENERATORA

Na rys. 5 przedstawiono przykład rozwiązania układu elektroenergetycznych zabezpieczeń generatora powiązanego bezpośrednio z szynami zbiorczymi.

Ze względu na wymaganą niezawodność działania zabezpieczeń generatora, przewidziano dwa nawzajem rezerwujące się zespoły A i B. Każdy z nich wyposażono

w niezależny układ zasilania napięciem pomocniczym oraz niezależny układ obwodów wyjściowych, przystosowany do sterowania niezależnymi elektromagnesami elementów wykonawczych (wyłączniki, zawory) turbogeneratora. Niektóre funkcje zabezpieczeniowe podwójono. Przewidziano zabezpieczenie nadmiarowo – prądowe (51TW) transformatora wzbudzenia generatora.



Rys. 5. Układ elektroenergetycznych zabezpieczeń generatora z cyfrowym urządzeniem CZAZ-GM

Literatura

1. Karta katalogowa. Cyfrowy Zespół Automatyki Zabezpieczeniowej CZAZ-GTM/GM, ZEG-ENERGETYKA Sp. z o. o. Tychy,
2. S. Wróblewska, Z. Kuran, H. Dytry, „Aktualne zagadnienia w dziedzinie automatyki zabezpieczeniowej turbogeneratora”, Politechnika Warszawska, XXXV Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych „Maszyny Elektryczne w Energetyce”, 14-16 czerwca 1999 r. Kazimierz Dolny,
3. S. Wróblewska, „Aktualne rozwiązania zabezpieczeń zapobiegających niestabilnej pracy turbogeneratora w warunkach niedowzbudzenia, Automatyka Elektroenergetyczna, nr 1, 2001.