

Modelowanie układu zabezpieczeń elektroenergetycznych dużego bloku wytwórczego

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące automatyki zabezpieczeniowej bloków wytwórczych. Opisano zestaw zabezpieczeń dużego bloku wytwórczego oraz stany awaryjne pracy bloku, na które te zabezpieczenia wpływają. Opisano zamodelowany w programie PSCAD/EMTDC blok wytwórczy wraz z układem zabezpieczeń elektroenergetycznych. Zamodelowany układ odzwierciedla stanowisko laboratoryjne. Przedstawiono przykładowe wyniki badań zamodelowanego zabezpieczenia od utraty wzbudzenia generatora.

Abstract. Issues related to power protection of power generating units are described in the submitted paper. A set of power protection system for a large power generating unit is described, as well as emergency states of the unit's operation which are affected by these protections. A power generating unit modeled in the PSCAD/EMTDC program was described together with the power protection system. The modeled system represents a laboratory stand. Examples of tests of the modeled protection against loss of field are presented. **(Modeling of the power protection system of a large power generating unit).**

Słowa kluczowe: bloki wytwórcze, automatyka zabezpieczeniowa, modelowanie zabezpieczeń, PSCAD/EMTDC.

Keywords: power generating units, power system protections, modeling of power system protections, PSCAD/EMTDC.

Wstęp

Bloki wytwórcze są istotnymi elementami systemu elektroenergetycznego (SEE). Do części elektrycznej dużych bloków wytwórczych (np. o mocy znamionowej 360 MW) można zaliczyć: generator, transformator blokowy, transformator odczepowy (potrzeb własnych), transformator wzbudzenia. Ze względu na ich rolę oraz skomplikowaną budowę, a co za tym idzie wiele rodzajów zakłóceń jakie mogą w nich wystąpić wyposaża się je w rozbudowany układ automatyki zabezpieczeniowej. W celu zabezpieczenia dużego bloku wytwórczego od skutków zakłóceń elektrycznych (zwarcia, przeciążenia, praca asynchroniczna itp.) potrzeba kilkadziesiąt zabezpieczeń [1-4]. Funkcje zabezpieczeniowe oraz powiązania logiczne między nimi, realizowane są w dedykowanych urządzeniach zabezpieczeniowych. Obecnie urządzenia te realizowane są w technice cyfrowej.

W uczelniach technicznych na specjalności Elektroenergetyka studentom przekazywana jest wiedza z zakresu elektrycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ). Istotną częścią tej wiedzy jest znajomość zabezpieczeń elektroenergetycznych bloków wytwórczych.

W celu ułatwienia studentom szybszego zrozumienia EAZ bloku wytwórczego w Instytucie Elektroenergetyki PW zbudowano odpowiednie stanowisko laboratoryjne [5, 6]. Stanowisko wyposażone jest w: (a) płytę czołową; (b) przekaźnik elektroenergetyczny REG 316*4; (c) tester mikroprocesorowy i wzmacniacz sygnałów analogowych (opcjonalnie); (d) komputer PC. Zostały w nim zaimplementowane zabezpieczenia dużego bloku wytwórczego wraz z logiką (układ logiczno-czasowy) sterowania jego łącznikami. Sposób przeprowadzania badań podczas zajęć dydaktycznych z wykorzystaniem stanowiska można znaleźć w [7].

W stanowisku, za pomocą testera mikroprocesorowego i wzmacniacza (podłączonych do odpowiednich zacisków na płycie czołowej stanowiska), istnieje możliwość wymuszenia wartości prądów i napięć odpowiadających określonemu rodzajowi zakłócenia. Sygnały te mają charakter "czystych" sinusoid o określonej amplitudzie i częstotliwości. Na ich podstawie sprawdzana jest poprawność pojawienia się odpowiednich stanów awaryjnych pracy bloku i czasów ich pobudzenia się.

Za pomocą wymuszenia "czystych" sinusoid sygnałów prądowych i napięciowych nie można odwzorować wielu

zakłóceń w pracy bloku wytwórczego (np. utrata wzbudzenia, praca asynchroniczna). W celu odwzorowania zakłóceń o przebiegach sygnałów analogowych zbliżonych do rzeczywistych, zamodelowano blok wytwórczy wraz z układem zabezpieczeń i logiką powiązań (układ logiczno-czasowy) między nimi. Zamodelowany układ odzwierciedla układ zaimplementowany w stanowisku laboratoryjnym. Można w nim zapisać próbki prądów i napięć występujące podczas symulacji wybranego zakłócenia do pliku w formacie COMTRADE. Dzięki temu przebiegi zakłócenia mogą zostać odtworzone za pomocą testera mikroprocesorowego, a co za tym idzie dorowadzone do przekaźnika REG 316*4 dostępnego w stanowisku. Takie podejście sprawia, że można sprawdzać (podczas symulowanych zakłóceń) poprawność działania zamodelowanych zabezpieczeń bloku wytwórczego oraz zabezpieczeń zaimplementowanych w stanowisku laboratoryjnym.

Układ zabezpieczeń elektroenergetycznych dużego bloku wytwórczego

Bloków wytwórczych pracujących SEE jest wiele. Informacje o zabezpieczeniach wykorzystywanych w tych obiektach można znaleźć m.in. w [1-4]. W [8] przedstawiono najczęściej spotykane w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym układy bloków wytwórczych oraz omówiono sposoby nastawiania dedykowanych do ich ochrony zabezpieczeń. Bloki wytwórcze różnią się od siebie wartością mocy generowanej, co pociąga za sobą różnorodność pozostałych parametrów elektrycznych, mechanicznych i cieplnych.

W celu zamodelowania układu zabezpieczeń dużego bloku wytwórczego należało przyjąć konkretne rozwiązanie bloku. Przyjęto model układu zabezpieczeń bloku wytwórczego o mocy znamionowej 360 MW (zestaw B zabezpieczeń przewidzianych dla tego typu bloku), który funkcjonuje w laboratorium Instytutu Elektroenergetyki PW i pełni rolę stanowiska dydaktycznego [7]. Zestawienie zamodelowanych zabezpieczeń przedstawiono w tabeli 1.

Oprócz zabezpieczeń elektrycznych w zamodelowanym układzie uwzględniono wybrane zabezpieczenia technologiczne, m.in. przekaźniki gazowo-przepływowe Buchholza kadzi transformatorów blokowego, odczepowego i wzbudzenia (GkTb, GkTo, GkTW_{R,S,T}), od spadku przepływu destylatu chłodzącego stojan generatora (DpGn).

Sygnaly pobudzeń z zabezpieczeń bloku wytwórczego wprowadzane są do układu powiązań logiczno-czasowych. Sygnaly wyjściowe z tego układu zbierane są przez dystrybutor impulsów stanów awaryjnych pracy bloku (PW). Dla bloku o mocy 360 MW przewidziano pięć stanów awaryjnych. Ich opis przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Zamodelowane zabezpieczenia bloku wytwórczego

Oznaczenie (kod ANSI)	Nazwa zabezpieczenia
RBI (87T)	Różnicowe bloku
RT0 (87T)	Różnicowe transformatora odczepowego
Z1Gn (59G/N)	Ziemnozwarciowe stojana generatora obejmujące 95% uzwojeń
As (46)	Od asymetrii obciążenia generatora (stopień sygnalizacyjny) (char. niezależna)
A (46)	Od asymetrii obciążenia generatora (stopień wyzwalający) (char. zależna)
UtBI (59)	Nad napięciowe bloku
ZsW (64R)	Od pojedynczych zwarc w obwodzie wzbudzenia generatora (stopień sygnalizacyjny)
ZW (64R)	Od pojedynczych zwarc w obwodzie wzbudzenia generatora (stopień wyzwalający)
Pz (32)	Od przepływu mocy zwrotnej
lpW (49R)	Od przeciążeń w obwodzie wzbudzenia generatora
XW, UW (40, 27)	Od utraty wzbudzenia generatora
U0 (59GN)	Od zwarc doziemnych po stronie GN bloku (napięciowe)
I0 (51NT)	Od zwarc doziemnych po stronie GN bloku (prądowe)
Pm (67)	Od zrzutu mocy
Ft (81U)	Podczęstotliwościowe potrzeb własnych bloku
UtF (24)	Od przewzbudzenia transformatora blokowego
UtWs (27)	Podnapięciowe wzbudnicy pomocniczej
ItW (51E)	Od przetężeń transformatora wzbudzenia
IwGn (50)	Blokujące otwarcie rozłącznika generatorowego

Tabela 2. Opis stanów awaryjnych pracy bloku wytwórczego

Stan awaryjny	Opis
PW I	Odcięcie bloku od systemu, generator pracuje na potrzeby własne bloku. Kocioł znajduje się w stanie pracy BLT odpowiadającemu biegowi jałowemu (luzem) turbiny
PW II	Bieg jałowy turbiny, wyłączenie części elektrycznej bloku, generator jest wyłączony i odwzbudzony. Kocioł znajduje się w stanie pracy odpowiadającemu biegowi jałowemu (luzem) turbiny (BLT)
PW III	Praca jałowa (luzem) kotła (PLK), turbozespół odstawiony z pracy
PW IV	Całkowite wyłączenie bloku z pracy (ACO – automatyczne całkowite odstawienie), blok został odstawiony z pracy
PW V	Potrzeby własne bloku zasilane są z sieci poprzez transformator blokowy (gdy zastosowano wyłącznik lub rozłącznik generatorowy), generator został wyłączony, kocioł znajduje się w stanie pracy odpowiadającemu biegowi jałowemu (luzem) turbiny (BLT)

Pobudzenie danego stanu awaryjnego związane jest z konkretnym, odpowiednim dla tego stanu zestawem działań podejmowanych przez automatykę. Działania te prowadzą się m.in. do wysłania impulsu na otwarcie określonego zestawu łączników dostępnych w obrębie bloku oraz pobudzenia odpowiedniej automatyki bloku. Wybrane, ważne zdarzenia w pracy bloku (np. pobudzenie się stanów awaryjnych pracy bloku, zadziałanie wybranych zabezpieczeń) sygnalizowane są za pomocą odpowiedniej lampki w kasetonie centralnej sygnalizacji bloku.

Opis zamodelowanego układu

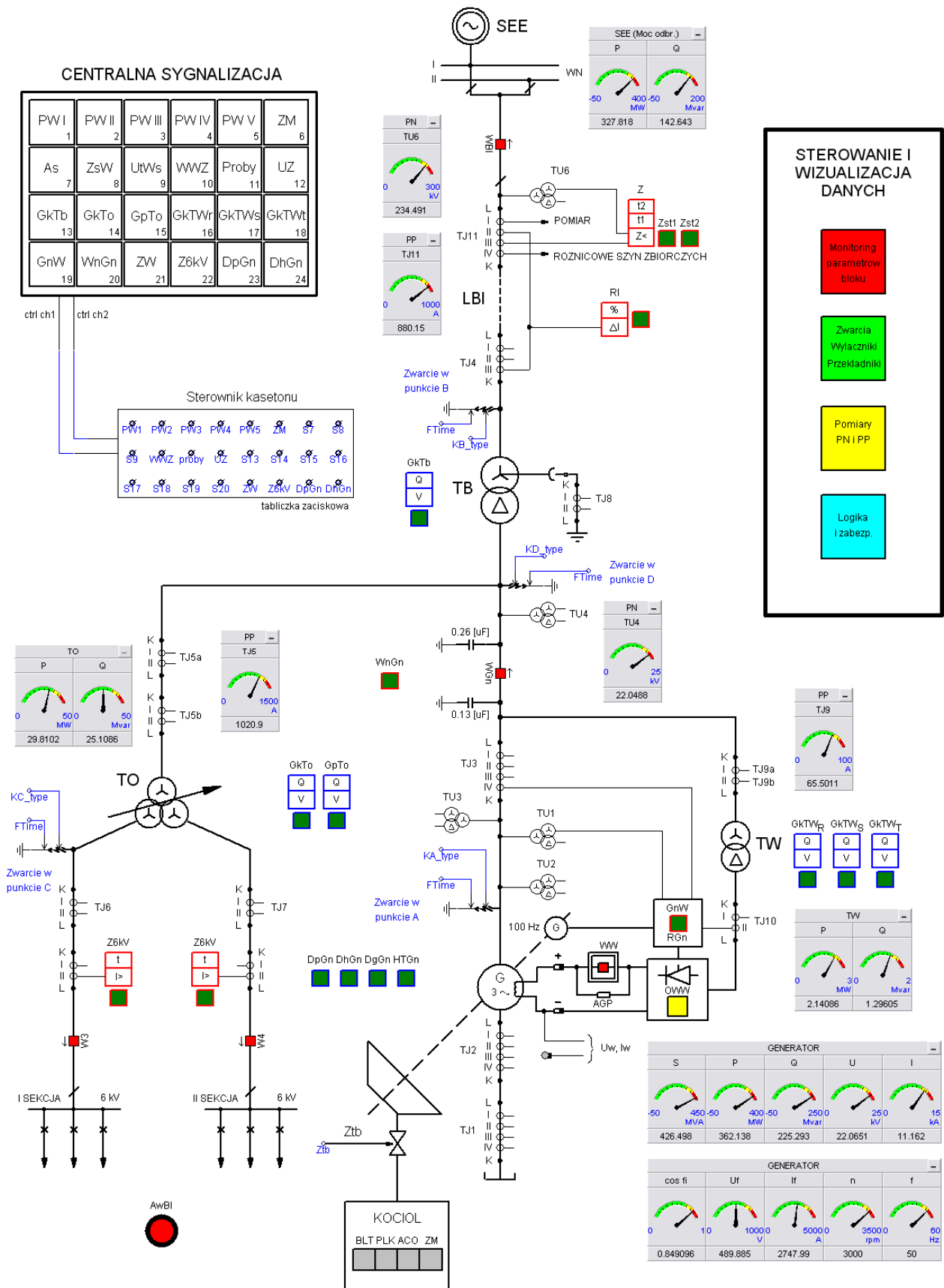
W ramach pracy [9] w programie PSCAD/EMTDC zamodelowano blok wytwórczy o mocy 360 MW wraz z układem zabezpieczeń. Zamodelowany układ odzwierciedla stanowisko laboratoryjne do badania zabezpieczeń bloku wytwórczego [7].

Stworzony projekt symulacyjny jest układem bardzo złożonym. Aby uczynić jego strukturę bardziej przejrzystą, stroną główną projektu podzielono na sekcje: (a) Obwody pierwotne bloku wytwórczego, (b) Zabezpieczenia i logika, (c) Sterowanie i wizualizacja danych, (d) Centralna sygnalizacja, (e) Komunikacja bezprzewodowa z podstronami modelu, (f) Pomiary parametrów bloku, (g) Sterowanie wyłącznikami, (h) Sterowanie zwarciownikami, (i) Przekładniki, (j) Pomiary i przetwarzanie sygnałów z przekładników, (k) Sterowanie centralną sygnalizacją, (l) Monitoring pobudzenia zabezpieczeń i stanów awaryjnych, (m) Zabezpieczenia pobudzane ręcznie, (n) Monitoring położenia wyłączników, (o) Powiązanie stanów awaryjnych z wyłącznikami, (p) Sterowanie stanem i testami zabezpieczeń, (r) Rejestrator zakłóceń RTP/COMTRADE. W wymienionych sekcjach zgrupowane zostały elementy o podobnym przeznaczeniu.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat obwodów pierwotnych bloku wytwórczego odwzorowanych w programie PSCAD/EMTDC wraz z wybranymi układami pomiarowymi oraz sekcje "Centralna sygnalizacja" i "Sterowanie i wizualizacja danych". Schemat przedstawiony na rysunku 1 z dużą dokładnością odwzorowuje schemat obwodów pierwotnych bloku znajdujący się na płycie czołowej stanowiska laboratoryjnego (pod przedstawioną grafiką obwodów pierwotnych bloku znajduje się model wykonany z elementów biblioteki programu PSCAD/EMTDC). Jak widać modelowany obiekt składa się, w części elektrycznej z generatora synchronicznego (G) z którego moc wprowadzana jest do SEE za pomocą transformatora blokowego (TB) i linii blokowej (LBI). Dodatkowym obciążeniem generatora jest transformator wzbudzenia (TW), zasilający prostownik sterowany (układ wzbudzenia), oraz transformator odczepowy (TO), zasilający dwie sekcje potrzeb własnych bloku. W układzie regulacji generatora oprócz statycznego układu wzbudzenia wraz z regulatorem i stabilizatorem systemowym zamodelowano turbinę wraz z regulatorem.

Przedstawiona na rysunku 1 sekcja "Sterowanie i wizualizacja danych" stanowi interfejs pomiędzy modelem symulacyjnym, a użytkownikiem (podczas pracy z projektem użytkownik nie dokonuje w obrębie pozostałych sekcji żadnych zmian). Zawiera ona elementy, które pozwalają użytkownikowi na sterowanie pracą modelu symulacyjnego (przyciski, przełączniki, suwaki, itp.) oraz elementy, które pozwalają na obserwację wyników jego pracy (przebiegi czasowe sygnałów analogowych i dwustanowych, wykresy fazorowe, itp.). Sekcja ta dodatkowo została podzielona na mniejsze podsekcje (np. Pomiary PN i PP). Jest ona jedyną, w której użytkownik dokonuje, podczas pracy z modelem, jakichkolwiek modyfikacji (np. zmiany położenia przełączników lub suwaków, skalowanie przebiegów na wykresach). Każda operacja jakiej dokonuje użytkownik dokonywana jest z wykorzystaniem tej sekcji (np. wybór miejsca zwarcia, trybu pracy zabezpieczenia lub przekładnika).

Druga z sekcji przedstawionych na rysunku 1 to "Centralna sygnalizacja". Odzworowuje ona wygląd kasetonu centralnej sygnalizacji znajdującego się w stanowisku laboratoryjnym. Jego działanie polega na sygnalizacji (odpowiednie pole jest podświetlane) w przypadku pojawienia się określonego stanu awaryjnego pracy bloku lub zadziałania określonego zabezpieczenia.



Rys.1. Schemat obwodów pierwotnych bloku wytwórczego wraz z wybranymi pomiarami odwzorowany w programie PSCAD/EMTDC oraz sekcje "Centralna sygnalizacja" i "Sterowanie i wizualizacja danych" [9]

Zamodelowany układ zabezpieczeń bloku wytwórczego

W sekcji "Zabezpieczenia i logika" projektu symulacyjnego znajdują się zamodelowane zabezpieczenia bloku wraz z układem logiczno-czasowym ich powiązań z awaryjnymi stanami pracy bloku. Zestaw zamodelowanych zabezpieczeń przedstawiono w tabeli 1. Zamodelowane zabezpieczenia mają sposób działania, charakterystyki rozruchowe i sposób nastawiania podobny do funkcji zabezpieczeniowych przełącznika REG 316*4 [10] zainstalowanego w stanowisku laboratoryjnym.

W tabeli 2 opisano przewidziane awaryjne stany pracy dla zamodelowanego bloku wytwórczego, a w tabeli 3 przedstawiono działania podejmowane przez jego automatykę po wystąpieniu każdego z nich. Oznaczenia poszczególnych łączników, układów automatyki i lampek centralnej sygnalizacji (CS) znajdują się na rysunku 1.

Tabela 3. Zestawienie stanów awaryjnych pracy bloku oraz pobudzanych łączników i układów automatyki

Stan awaryjny pracy bloku	Pobudzone łączniki, układy automatyki i lampki centralnej sygnalizacji
PW I	W1 (WBI), W7 (BLT), CS: S1
PW II	W1 (WBI), W2 (WW), W3 (PW3), W4 (PW4), W7 (BLT), CS: S2
PW III	W1 (WBI), W2 (WW), W3 (PW3), W4 (PW4), W6 (Ztb), W8 (PLK), CS: S3
PW IV	W1 (WBI), W2 (WW), W3 (PW3), W4 (PW4), W6 (Ztb), W9 (ACO), CS: S4
PW V	W2 (WW), W5 (WGN), W7 (BLT), CS: S5

Na rysunku 2 przedstawiono fragment zamodelowanego układu zabezpieczeń bloku wytwórczego wraz z układami logiczno-czasowymi. Jak widać przedstawione zabezpieczenia (Ft, UtBI, XW, UW) poprzez odpowiednie powiązania (elementy czasowe, całkujące, bramki logiczne) po uwzględnieniu stanu odpowiednich łączników (WBI, WGN, WW) oddziałują na odpowiednie stany awaryjne pracy bloku (PW II, PW V). Sygnały pomiarowe (prądy, napięcia) do poszczególnych zabezpieczeń doprowadzane są z przekładników, których rozmieszczenie pokazano na rysunku 1.

Przykładowe wyniki badań

Zamodelowany układ zabezpieczeń bloku wytwórczego został poddany badaniom pod kątem poprawności ich działania. Wykonano dużą liczbę różnego rodzaju testów w celu sprawdzenia poprawności działania każdego z zamodelowanych zabezpieczeń. Badania polegały m.in. na symulacji różnego rodzaju zwarc w różnych miejscach bloku wytwórczego (rozmieszczenie zwarcowników przedstawiono na rysunku 1), utraty wzbudzenia generatora, zrzutu mocy, odciążenia pary od turbiny (praca silnikowa generatora), asymetrii obciążenia generatora.

Poniżej przedstawiono wyniki sprawdzenia zabezpieczenia od utrat wzbudzenia. Zabezpieczenie to składa się z dwóch elementów (rys.2): zabezpieczenia podnapięciowego (UW) i podreaktancyjnego (XW). Sygnały

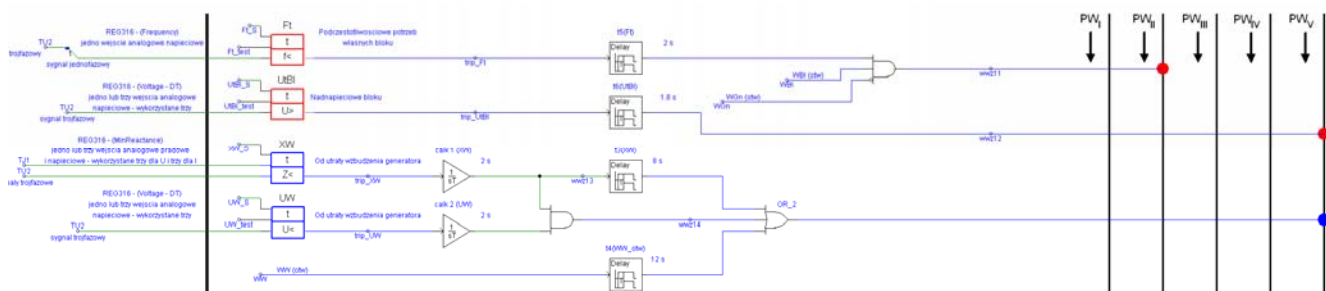
wyjściowe z tych zabezpieczeń po przejściu przez elementy całkujące, czasowe i logiczne pobudzają piąty awaryjny stan pracy bloku (PW V).

Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi wybranych parametrów pracy generatora podczas zasymulowanej utraty wzbudzenia. Po otwarciu wyłącznika wzbudzenia WW (2 s symulacji) moc bierna Q generowana przez maszynę zaczyna spadać. Podobnie dzieje się z napięciem U na zaciskach generatora. Moc czynna P pozostaje na prawie niezmiennym poziomie. Nawet po przejściu przebiegu mocy biernej przez zero maszyna jest w stanie w dalszym ciągu wytwarzać moc czynną, dowzbudzając się z sieci (następuje pobór mocy biernej z sieci). Utrzymująca się na względnie stałym poziomie moc czynna, powoduje zwiększanie się wartości prądu przy malejącym napięciu na zaciskach generatora. W pewnym momencie jest ono zbyt niskie, żeby utrzymać generowaną moc czynną. Dochodzi do kołysań mocy (nie należy ich mylić z przebiegami podczas kołysań mocy generatora wzbudzonego).

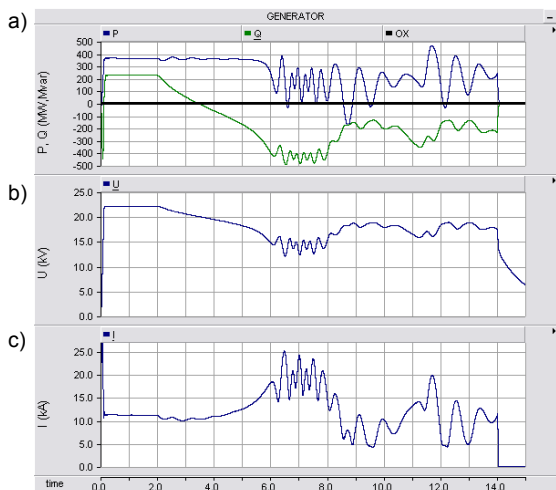
Zmiany trajektorii wektora impedancji ruchowej $\underline{Z}(t)$ widzianej z zacisków generatora (strona wtórna przekładników) do chwili wyłączenia generatora (14 s symulacji) zostały przedstawione na rysunku 4. Na rysunku tym kierunek zmian trajektorii oznaczono strzałkami. Jak widać wektor impedancji ruchowej, po wejściu do okręgu charakterystyki rozruchowej zabezpieczenia XW, pozostaje w nim właściwie przez cały czas trwania testu.

Na rysunku 5 pokazano przebiegi czasowe wybranych sygnałów związanych z działaniem zabezpieczenia podnapięciowego UW. Jak widać pobudzenie zabezpieczenia (PICK-UP) następowało za każdym razem, gdy napięcie na zaciskach generatora obniżyło się poniżej nastawionej wartości 40 V. Element całkujący (INT) (całk 2 (UW) na rys.2) służący do zliczania sumarycznego czasu pobudzeń zabezpieczenia UW zwiększał swoją wartość za każdym razem, gdy zabezpieczenie UW było pobudzone. Sygnał wyłączający (TRIP) z zabezpieczenia został wygenerowany, gdy na wyjściu elementu całkującego pojawił się sygnał logiczny 1. Nastąpiło to po 14 s od początku symulacji (rys.5), gdy napięcie na zaciskach generatora spadło poniżej wartości rozruchowej zabezpieczenia UW. Ten spadek napięcia wynikał z powodu podania impulsu na pobudzenie stanu awaryjnego PW V (powoduje m.in. otwarcie wyłącznika WGN generatora) z timera t4(WW_otw) (rys.2) po odliczeniu nastawionej zwłoki czasowej 12 s od chwili otwarcia wyłącznika wzbudzenia WW.

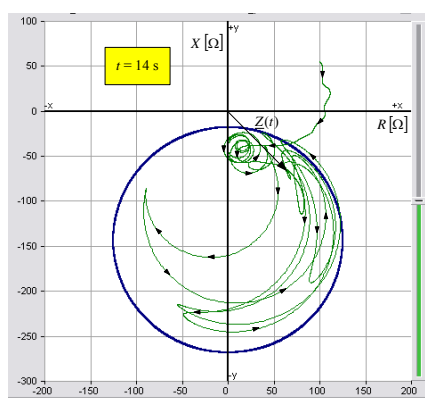
Na rysunku 6 przedstawiono widok kasetonu centralnej sygnalizacji po zakończonym teście zabezpieczenia od utraty wzbudzenia generatora. Jak widać zgodnie z oczekiwaniami zapaliły się lampki PW V (co jest zgodne z rys.2) i WWZ (wewnętrzny wskaźnik zadziałania informujący o zadziałaniu jakiegokolwiek zabezpieczenia bloku).



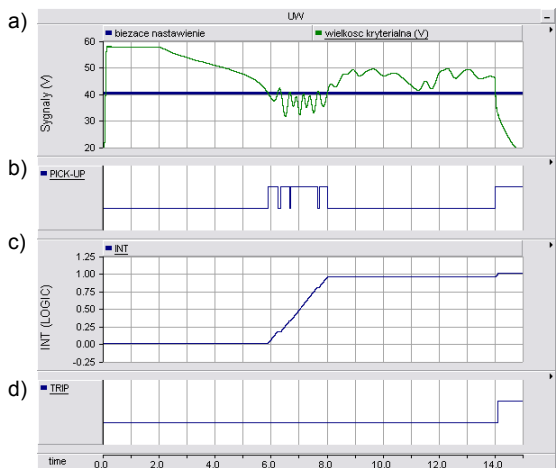
Rys.2. Fragment zamodelowanego układu zabezpieczeń bloku wytwórczego wraz z układami logiczno-czasowymi [9]



Rys.3. Przebiegi wybranych parametrów pracy generatora podczas utraty wzbudzenia: a) moc czynna P i bierna Q , b) napięcie międzyfazowe U , c) prąd I [9]



Rys.4. Zmiany trajektorii wektora impedancji ruchowej $\underline{Z}(t)$ widzianej z zacisków generatora przy utracie wzbudzenia [9]



Rys.5. Działanie zabezpieczenia UW: a) przebieg wielkości kryterialnej względem nastawienia, b) sygnał pobudzenia, c) sygnał z elementu całkującego, d) sygnał zadziałania [9]

Podsumowanie

Układy zabezpieczeń elektroenergetycznych dużych bloków wytwórczych są bardzo rozbudowane. Ze względu na wiele rodzajów zakłóceń mogących wystąpić w bloku liczba zabezpieczeń zależy m.in. od mocy znamionowej bloku i może dochodzić do kilkudziesięciu. Poszczególne zabezpieczenia działają za pomocą odpowiednich powiązań logiczno-czasowych na stany awaryjne pracy bloku, a te z kolei na łączniki i układy automatyki w nim

przewidziane. Ułatwieniem zrozumienia zagadnień dotyczących automatyki zabezpieczeniowej w procesie dydaktycznym studentów specjalności Elektroenergetyka mogą być fizyczne stanowiska laboratoryjne lub modele symulacyjne. Dostęp do stanowisk laboratoryjnych jest zwykle ograniczony do czasu trwania zajęć dydaktycznych. Z tego powodu wygodnym rozwiązaniem w celu bardziej dogłębnego zrozumienia działania automatyki zabezpieczeniowej bloku wytwórczego i jego układu zabezpieczeń jest jego zamodelowanie w programie symulacyjnym.

CENTRALNA SYGNALIZACJA

PW I	PW II	PW III	PW IV	PW V	ZM
As	ZsW	UIWs	WWZ	Proby	UZ
GkTb	GkTo	GpTo	GkTWr	GkTWs	GkTWt
GnW	WnGn	ZW	ZkV	DpGn	DhGn

Rys.6. Widok kasetonu centralnej sygnalizacji po zakończonym teście zabezpieczenia od utraty wzbudzenia generatora [9]

Zamodelowanie przedstawionego układu było procesem długotrwałym, a opisany w artykule projekt symulacyjny jest dość rozbudowany i skomplikowany. Odzworowuje on podstawowe elementy elektryczne dużego bloku wytwórczego oraz układ jego zabezpieczeń elektroenergetycznych. Można w nim zasymulować wiele różnego rodzaju zakłóceń i dzięki temu analizować poprawność działania zamodelowanej automatyki zabezpieczeniowej. Dzięki przyjaznemu interfejsowi użytkownika może być on bardzo wygodnym narzędziem do analizy zakłóceń występujących w bloku wytwórczym oraz jego automatyki zabezpieczeniowej. Wygenerowane w projekcie symulacyjnym przebiegi zakłóceń mogą zostać wykorzystane do sprawdzenia poprawności działania przekaźnika elektroenergetycznego dostępnego w stanowisku laboratoryjnym.

Autor: dr inż. Adam Smolarczyk, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662, Warszawa, Polska, E-mail: adam.smolarczyk@ien.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Winkler W., Wiszniewski A., *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 2004
- [2] IEEE Power and Energy Society (PES), *IEEE Std C37.102-2006 - IEEE Guide for AC Generator Protection*, 16 Feb. 2007
- [3] IEEE Power and Energy Society (PES), *IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators, Special Publication of the IEEE Power System Relaying Committee*, IEEE 2011
- [4] CIGRE, *International Guide on the Protection of Synchronous Generators*, Working Group B5.04, October 2011
- [5] Smolarczyk A., Nowoczesne stanowisko dydaktyczne do badania urządzeń automatyki zabezpieczeniowej dużych bloków wytwórczych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr 11, 99-104
- [6] Smolarczyk A., Rasolomampionona D., A Modern Laboratory Test Bench for Power Protection Unit Testing, *EnergyCon 2016, IEEE International Energy Conference*, 4-8 April 2016, Leuven, Belgium
- [7] Smolarczyk A. i inni, *Laboratorium cyfrowej elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2016
- [8] Machowski J. i inni, *Zasady doboru i nastawiania zabezpieczeń elementów systemu elektroenergetycznego wysokiego napięcia*, Biblioteka OSP, PSE Operator S.A., Warszawa, 2010
- [9] Litwin T., *Wykorzystanie programu PSCAD/EMTDC do zamodelowania układu generator-sieć sztywna i wybranych zabezpieczeń z nim związanych*. Praca dyplomowa magisterska, Instytut Elektroenergetyki PW, Warszawa, 2016
- [10] ABB, *Numerical Generator Protection Type REG 316*4, Operating Instructions*, 1MRB52004-Uen, February 2000