



PRACA UKŁADU WZBUDZENIA I REGULACJI NAPIĘCIA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO W STANACH NIESYMETRYCZNYCH

dr hab. inż. Krzysztof Madajewski, profesor Instytutu Energetyki / Instytut Energetyki Oddział Gdańsk
mgr inż. Robert Rink / Instytut Energetyki Oddział Gdańsk

1. WPROWADZENIE

Tradycyjnie w modelach statycznych tyrystorowych układów wzbudzenia i regulacji, na potrzeby analiz systemowych napięcie wzbudzenia opisywane jest równaniem charakterystyki zewnętrznej prostownika wzbudzenia, z wykorzystaniem wartości średnich. Regulator napięcia dobierany jest z modeli standardowych IEEE lub opracowany indywidualnie, stosownie do celu badań. Sygnały wejściowe do regulatora napięcia, takie jak prądy, napięcia i moce są wyprowadzane wprost z modelu generatora i nie uwzględniają problemów z pomiarem, cyfrowym przetwarzaniem i niedoskonałościami przyjętych algorytmów wyznaczania użytecznych sygnałów prądów, napięć i mocy. Model generatora synchronicznego jest standardowo modelem Parka, z uwzględnieniem składowych rotacji, ale bez składowych transformacji. W konsekwencji w prądzie wzbudzenia w trakcie zaburzeń występują jedynie składowe aperiodyczne, a nie pojawiają się składowe oscylacyjne. Modele elementów infrastruktury sieciowej są opisywane z wykorzystaniem wartości dla składowych zgodnych. Takie modele układu wzbudzenia i regulacji napięcia oraz SEE są sprawdzone, powszechnie stosowane i potwierdziły swoją przydatność do badania stanów symetrycznych, w tym zwarć symetrycznych. Obliczenia są wykonywane szybko nawet dla dużych SEE. Modele takie nie są jednak użyteczne do badania stanów, w których dochodzi do różnych zaburzeń niesymetrycznych. Zbudowanie modelu, który umożliwi analizę stanów niesymetrycznych, jest związane z wieloma trudnościami i znacznym zwiększeniem czasu obliczeń.

Środowisko do badań symulacyjnych

Do badań symulacyjnych wykorzystano środowisko MATLAB-SIMULINK. Opracowany model należy do klasy tak zwanych układów sztywnych. Z jednej strony stałe czasowe generatora synchronicznego sięgają pojedynczych sekund, z drugiej strony procesy związane z modelowaniem prostownika wzbudzenia wymagają kroku całkowania liczonego w dziesiątkach mikrosekund. W wielu miejscach modelu konieczne jest cykliczne wyznaczanie dokładnych czasów przejść przez zero napięć lub próbkowanie sygnałów z określoną częstotliwością. Komplikację stanowi również konieczność uzyskania stanu ustalonego przed wprowadzaniem zaburzeń do modelu i wielokrotnego obliczenia z tego samego stanu początkowego. Wszystkie te problemy rozwiązano, a średni czas obliczeń jednej sekundy procesu symulacji wymagał około dwóch minut czasu rzeczywistego.

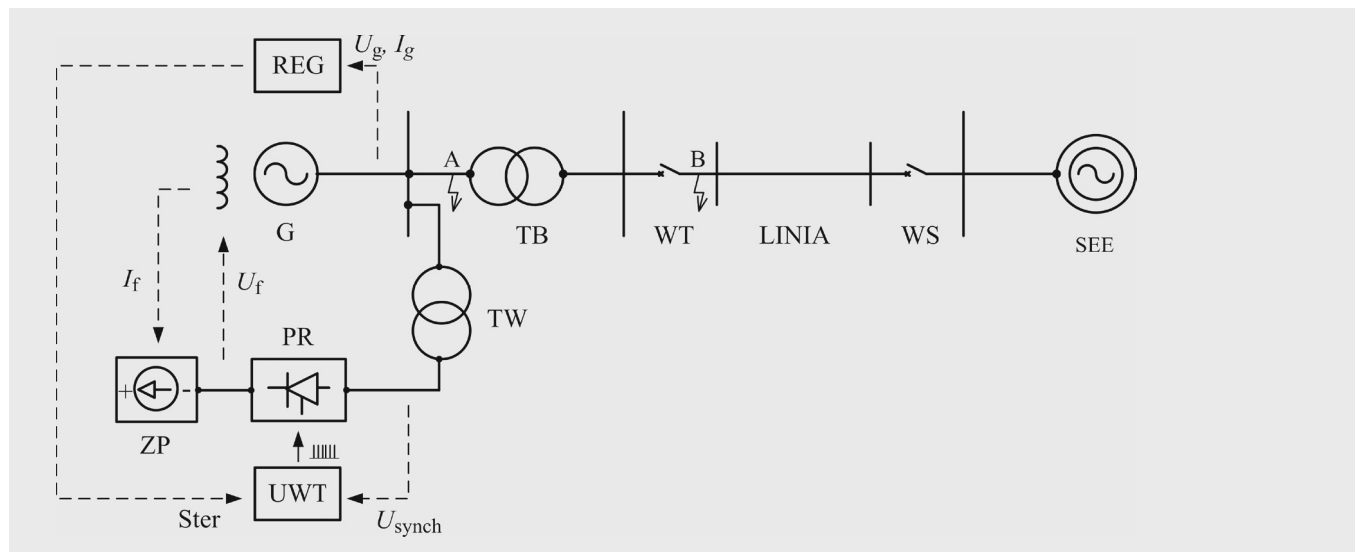
Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy pracy statycznego tyrystorowego układu wzbudzenia i regulacji napięcia generatora synchronicznego dużej mocy w niesymetrycznych stanach pracy. Analizowane niesymetrie są m.in. wynikiem zwarć niesymetrycznych w systemie elektroenergetycznym (SEE). Przedstawione wyniki badań uzyskano z modelu symulacyjnego, odwzorowującego chwilowe przebiegi czasowe w obwodach wzbudzenia i regulacji napięcia oraz w SEE. Model generatora synchronicznego uwzględnia składowe transformacji. Model prostownika wzbudzenia nie opisuje charakterystyki zewnętrznej prostownika z wykorzystaniem napięć średnich, jak to ma miejsce zazwyczaj, ale jest modelem opisującym napięcia chwilowe na wyjściu trójfazowego sześciopulsowego prostownika.

Prąd wzbudzenia generatora steruje w modelu źródłem prądowym wymuszającym prąd w prostowniku i transformatorze wzbudzenia. Model SEE uwzględnia impedancje zastępczej linii dla składowych symetrycznych. Sygnały wejściowe do modelu regulatora napięcia nie są wyprowadzane z modelu generatora, ale są wyznaczane z wykorzystaniem pomiarów z przekładników napięciowych i prądowych, a następnie cyfrowo przetwarzane w celu obliczenia użytecznych sygnałów sterujących. Model umożliwia szczegółowe analizowanie niesymetrycznych i zakłóconych stanów pracy generatora z układem wzbudzenia i regulacji napięcia. Jest on również niezbędny do analizy nowych rozwiązań w cyfrowych układach regulacji napięcia.

2. OPIS MODELU DLA STANÓW NIESYMETRYCZNYCH

Podstawowe elementy modelu generatora synchronicznego ze statycznym tyrystorowym układem wzbudzenia i regulacji napięcia dla stanów niesymetrycznych pokazano na rys. 1.

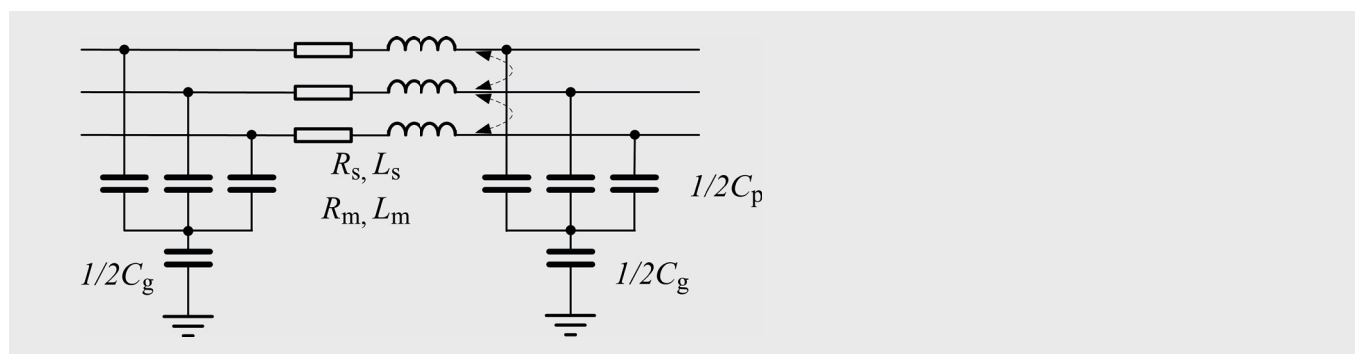


Rys. 1. Model generatora z układem wzbudzenia i regulacji napięcia do badania stanów niesymetrycznych (oznaczenia: G – generator, TB – transformator blokowy, WT, WS – wyłączniki, LINIA – zastępcza linia przesyłowa, TW – transformator wzbudzenia, PR – prostownik wzbudzenia, ZP – sterowane źródło prądowe, REG – regulator napięcia, UWT – układ wyzwalania tyrystorów, A, B – miejsca badanych zwarć)

2.1. Modele elementów infrastruktury sieciowej

Podstawowa struktura modelu to generator dużej mocy, pracujący przez transformator blokowy i zastępczą linię przesyłową na sieć sztywną. Jest to model trójfazowy z jawnym odwzorowaniem trzech faz. W modelu generatora wykorzystano model Parka uwzględniający składowe rotacji i transformacji. Generator pracuje z izolowanym punktem neutralnym, co jest rozwiązaniem typowym [1].

Model zastępczej linii przesyłowej pokazano na rys. 2. Model uwzględnia parametry impedancji sieci dla składowej zgodnej i zerowej.



Rys. 2. Model zastępczej linii przesyłowej dla stanów niesymetrycznych

Parametry linii określają zależności:

$$R_s = \frac{2R_1 + R_0}{3} \quad (2.1)$$

$$L_s = \frac{2L_1 + L_0}{3} \quad (2.2)$$

$$R_m = \frac{R_0 - R_1}{3} \quad (2.3)$$

$$L_m = \frac{L_0 - L_1}{3} \quad (2.4)$$

$$C_p = C_1 \quad (2.5)$$

$$C_g = \frac{3C_1C_0}{C_1 - C_0} \quad (2.6)$$

W modelu transformatora blokowego przyjęto grupę Ynd11 z uziemionym punktem gwiazdowym.

2.2. Model układu wzbudzenia

W badanym modelu zarówno prostownik (PR), jak i układ wyzwalania (UWT) zostały zamodelowane w sposób odwzorowujący z dużą dokładnością faktycznie zachodzące zjawiska. Prostownik jest modelem przekształtnika sześciopulsowego, sterowanego impulsami poprzez układ wyzwalania. Napięcie wyjściowe prostownika po dostosowaniu jednostek jest wprowadzane na wejście odpowiadające napięciu wzbudzenia w modelu generatora. Przekształtnik jest obciążony źródłem prądowym, którego prąd wyjściowy odpowiada prądowi wzbudzenia generatora. Źródło prądowe jest sterowane prądem wzbudzenia, otrzymywanym z modelu generatora synchronicznego. Przekształtnik jest zasilany z transformatora wzbudzenia o grupie połączeń Yd. Impedancja transformatora odpowiada za procesy komutacyjne przekształtnika. Do synchronizacji impulsów wyzwalających tyrystory w podstawowym wariantcie modelu wykorzystywane jest napięcie zasilające prostownik. Przebadano również wariant, w którym impulsy synchronizowano sygnałem z przekładników napięciowych generatora.

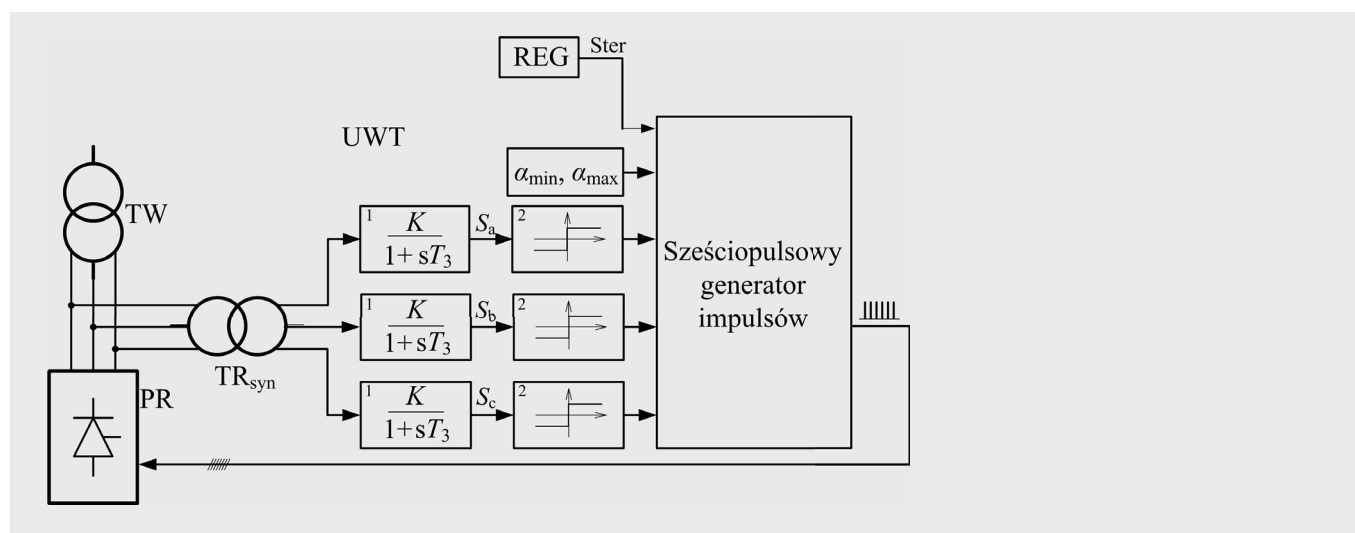
2.3. Model regulatora napięcia

Model układu regulacji obejmował główną pętlę regulacji napięcia na zaciskach generatora, stabilizator systemowy z sygnałem od mocy czynnej oraz człon kompensacji prądowej. Nie modelowano ograniczników regulacji.

Człon pomiarowe na zaciskach stojana generatora korzystały z sygnałów napięć fazowych i prądów z przekształtników. Sygnały te próbkowano z czasem próbkowania jednej milisekundy i realizowano obliczenia wyznaczające sygnały: napięcia, mocy czynnej, mocy biernej oraz częstotliwości.

2.4. Model układu wyzwalania tyrystorów

Model układu wyzwalania tyrystorów pokazano na rys. 3.



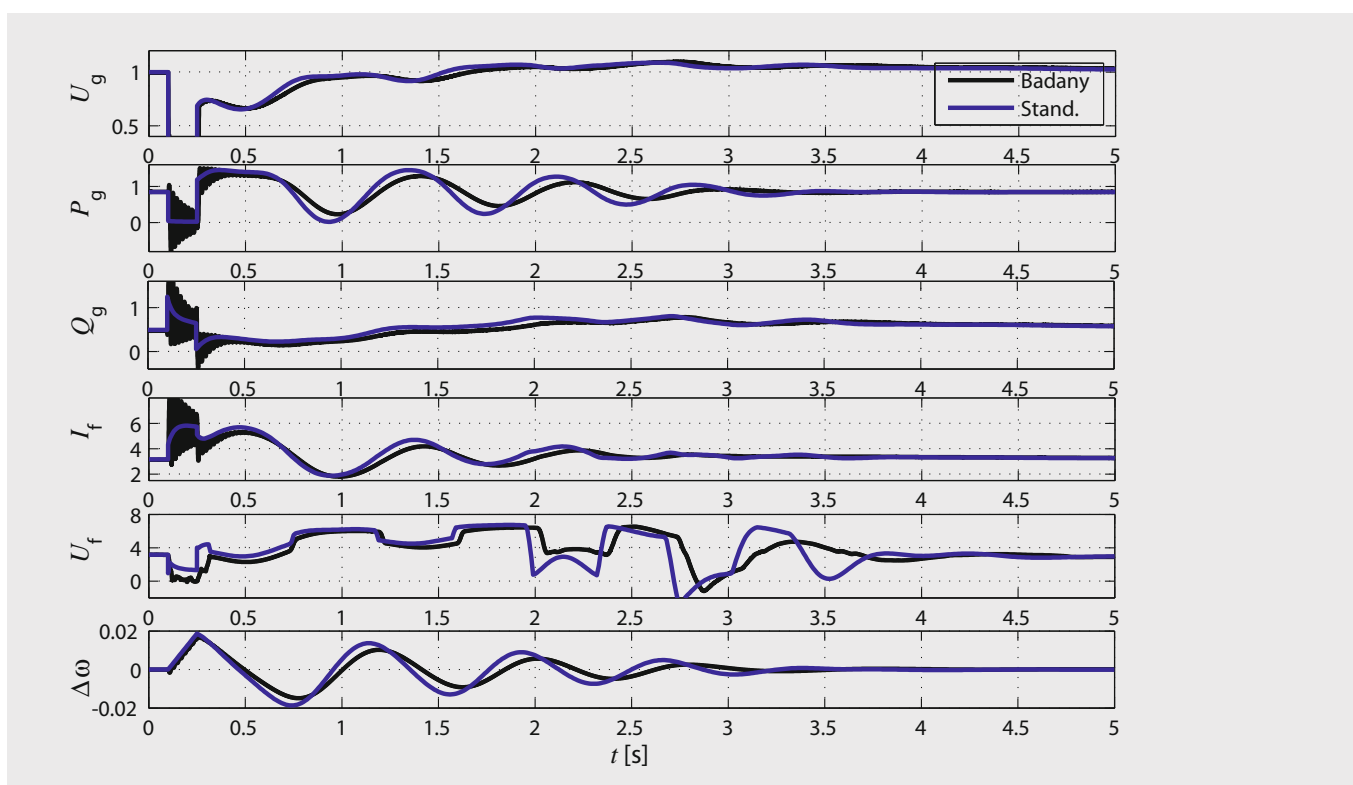
Rys. 3. Schemat ideowy układu wyzwalania tyrystorów (*TW* – transformator wzbudzenia, *PR* – prostownik wzbudzenia, *TR_{syn}* – transformator synchronizacji, *REG* – regulator napięcia, *UWT* – układ wyzwalania tyrystorów)

Sygnałami wejściowymi układu wyzwalania (*UWT*) są: kąt wyzwalania α z regulatora oraz napięcia synchronizacji z transformatorów synchronizacji (*TR_{syn}*), przyłączonych do napięcia zasilającego prostownik wzbudzenia. Układ połączeń transformatorów synchronizujących oraz transmitancja filtra są tak dobrane, aby otrzymać sygnały sinusoidalne praktycznie pozbawione zakłóceń, konieczne do wyznaczenia chwili przejścia przez zero napięć zasilających przekształtnik. Filtr jest tak dobrany, że zapewnia przesunięcie fazowe o -90° dla składowej o częstotliwości podstawowej. Uwzględnia się ten fakt w doborze grupy połączeń transformatorów synchronizacji, przesuwając napięcie o $+90^\circ$. Łączny efekt działania filtra i grupy połączeń transformatorów pozwala niemal wyeliminować zniekształcenia napięcia wykorzystywanego do synchronizacji impulsów wyzwalających spowodowane zapadami komutacyjnymi.

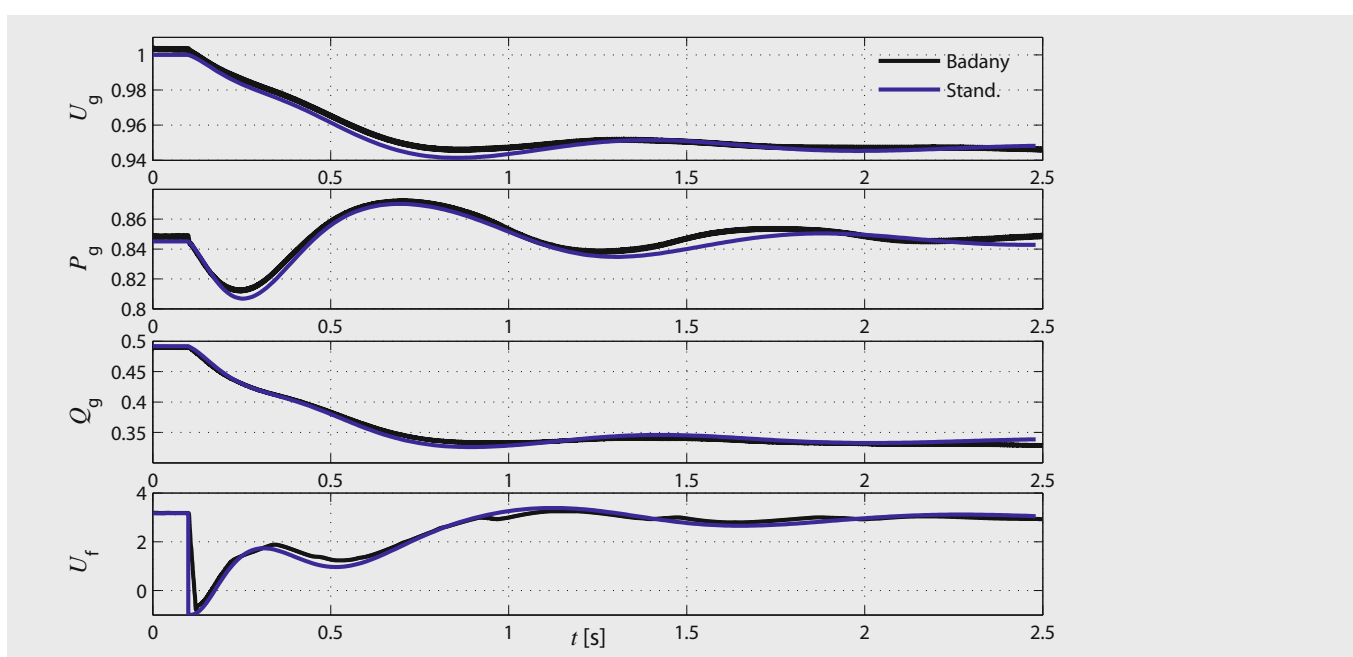
Sygnałami wyjściowymi z układu wyzwalania są impulsy sterujące wyzwalaniem tyrystorów przekształtnika, wysyłane indywidualnie do każdego z sześciu tyrystorów. Impulsy, tak jak w układzie rzeczywistym, są wysyłane parami – impuls załączający i impuls podtrzymujący.

2.5. Weryfikacja modelu

Poprawność zbudowanego modelu została zweryfikowana poprzez porównanie wyników symulacji z modelem zbudowanym w jednym z profesjonalnych programów do badań dynamiki systemu (DSATools). Wprowadzono analogiczne zaburzenia symetryczne w obu modelach i porównano przebiegi czasowe. Na rys. 4 pokazano przebiegi dla zwarcia trójfazowego w punkcie B (rys. 1), a na rys. 5 dla skokowej zmiany wartości zadanej napięcia. Przebiegi dla obu modeli wykazują dobrą zgodność. Modele układów regulacji napięcia stosowane przez Instytut Energetyki Oddział Gdańsk w badaniach dynamiki systemu weryfikowano wielokrotnie, porównując z rzeczywistymi przebiegami w SEE [2, 3].



Rys. 4. Przebiegi składowych napięcia i mocy generatora (U_g , P_g , Q_g), napięcia i prądu wzbudzenia (U_f , I_f) oraz odchylenia prędkości obrotowej generatora ($\Delta\omega$) dla modelu badanego oraz dla modelu standardowego w programie symulacyjnym DSATools podczas zwarcia trójfazowego w punkcie B



Rys. 5. Przebiegi składowych napięcia i mocy generatora (U_g , P_g , Q_g), napięcia wzbudzenia (U_f) dla modelu badanego oraz dla modelu standardowego w programie symulacyjnym DSATools po skokowej zmianie napięcia zadanej o 5%

3. WYNIKI SYMULACJI STANÓW NIESYMETRYCZNYCH

W referacie pokazano wyniki badań modelu dla:

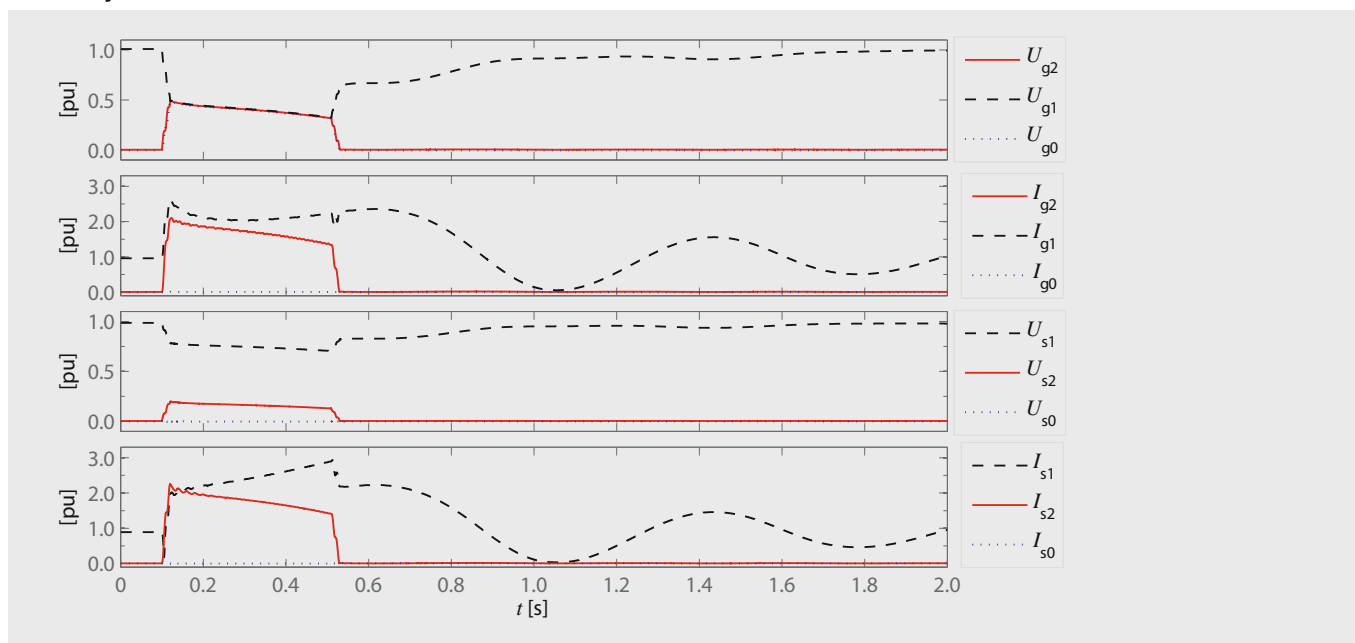
- zwarcia dwufazowego doziemnego na napięciu generatorowym w punkcie A (rys. 1)
- zwarcia dwufazowego doziemnego w sieci 400 kV w punkcie B (rys. 1)
- utraty jednego z sygnałów synchronizujących w układzie UWT.

Przebadano również wpływ zmiany źródła sygnału dla wyzwania tyrystorów (napięcie zasilające przekształtnik lub przekładniki napięciowe generatora).

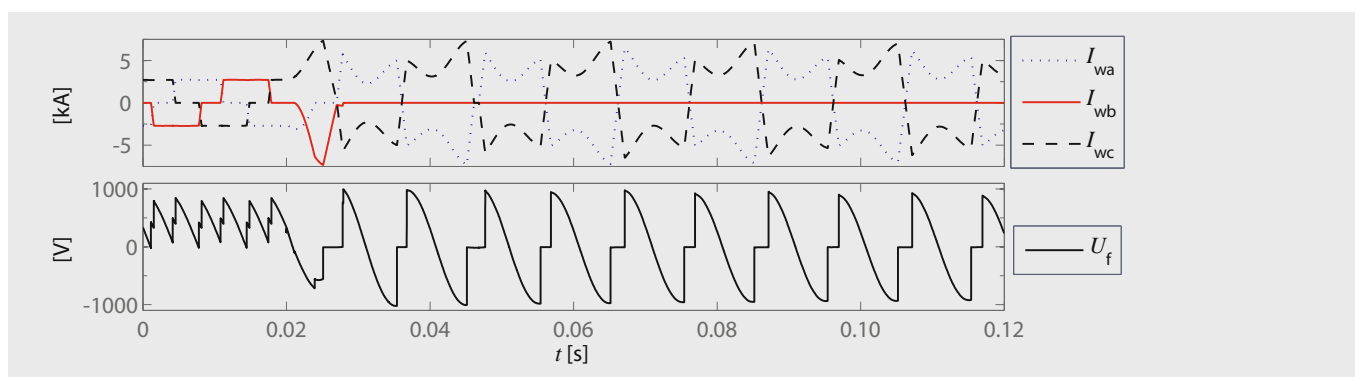
3.1. Zwarcie dwufazowe doziemne na napięciu generatorowym w punkcie A

W ustalonym stanie pracy z mocą znamionową dokonano zwarcia dwufazowego doziemnego o czasie trwania 400 ms w punkcie A. Pokazano przebiegi składowych symetrycznych napięć i prądów na zaciskach generatora i po stronie NN transformatora blokowego (rys. 6) oraz przebiegi chwilowe napięcia wzbudzenia oraz prądów transformatora wzbudzenia (rys. 7).

Generator zachowuje stabilność w badanych warunkach. W przebiegach napięcia wzbudzenia i prądów transformatora wzbudzenia (rys. 7) widać, że w trakcie zwarcia pracują jedynie tyrystory zasilane z dwóch faz napięcia transformatora wzbudzenia (a oraz c), chwilowa wartość napięcia wzbudzenia zmienia się niemal symetrycznie od wartości maksymalnej (ok. +1000 V) do wartości minimalnej (ok. -1000 V) co oznacza, że wartość średnia jest bliska zeru.



Rys. 6. Zwarcie dwufazowe doziemne ($t_{zw} = 400 \text{ ms}$) w punkcie A. Przebiegi składowych symetrycznych napięcia i prądu na zaciskach generatora (U_{g1} , U_{g2} , U_{g0} , I_{g1} , I_{g2} , I_{g0}) oraz po stronie GN na transformatorze blokowym (U_{s1} , U_{s2} , U_{s0} , I_{s1} , I_{s2} , I_{s0})

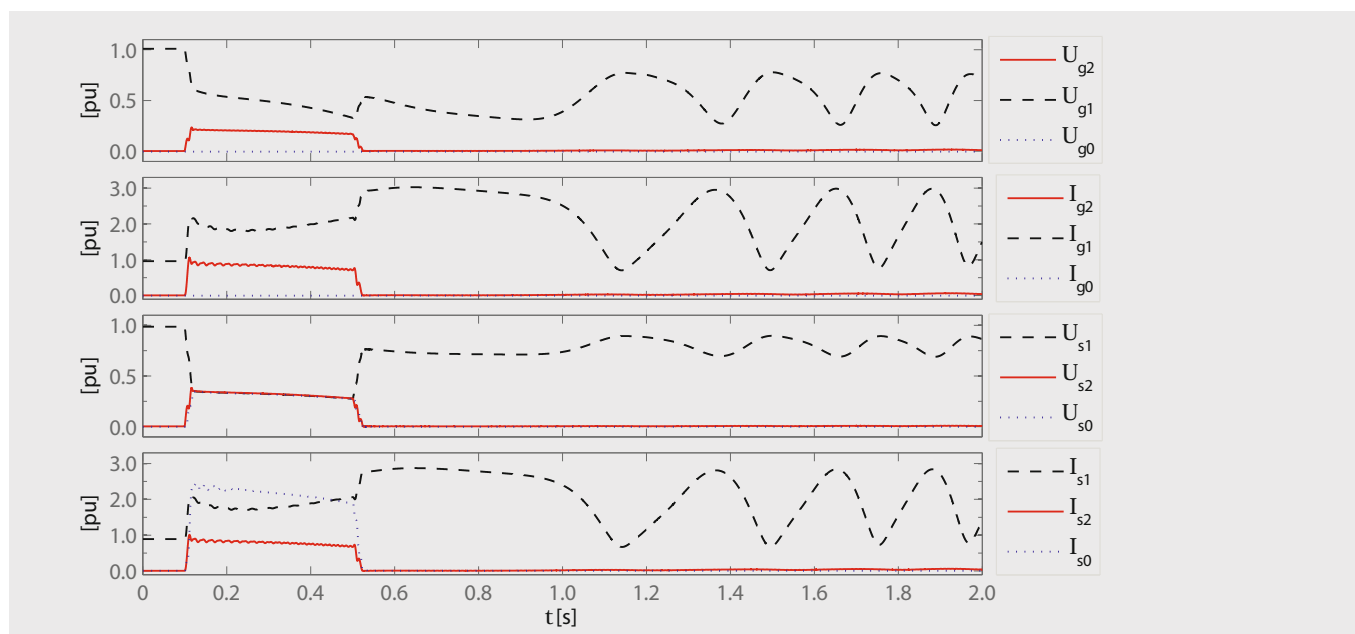


Rys. 7. Zwarcie dwufazowe doziemne w punkcie A. Przebiegi prądów transformatora wzbudzenia (I_{wa} , I_{wb} , I_{wc}) i chwilowego napięcia wzbudzenia (U_f)

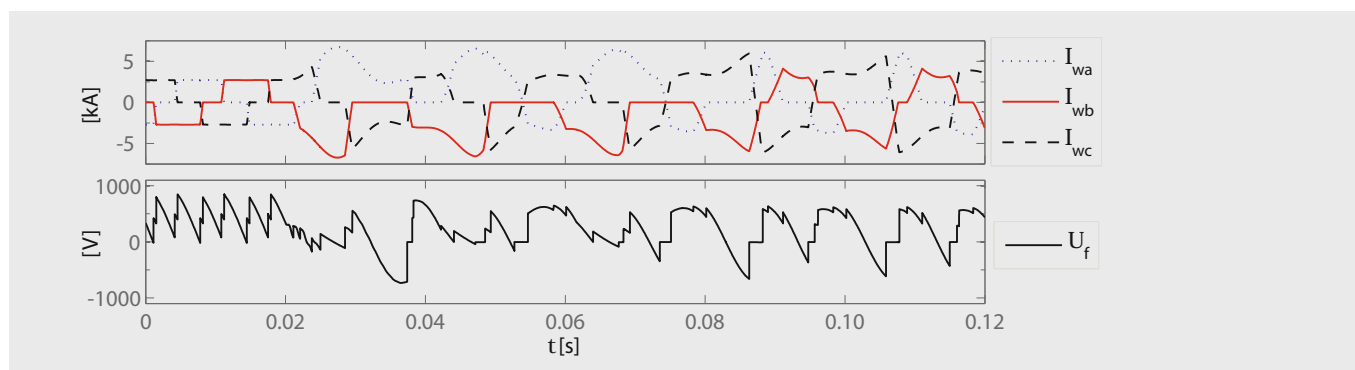
3.2. Zwarcie dwufazowe doziemne w sieci 400 kV w punkcie B

W ustalonym stanie pracy z mocą znamionową dokonano zwarcia dwufazowego doziemnego o czasie trwania 400 ms w punkcie B. Na rys. 8 pokazano przebiegi składowych symetrycznych napięć i prądów na zaciskach generatora i po stronie NN transformatora blokowego. Na rys. 9 i 10 przedstawiono przebiegi chwilowe napięcia wzbudzenia oraz prądów transformatora wzbudzenia (na rys. 9 – dla synchronizacji układu wyzwalania z napięć zasilających przekształtnik, a na rys. 10 – dla synchronizacji z przekładnikami napięciowymi generatora).

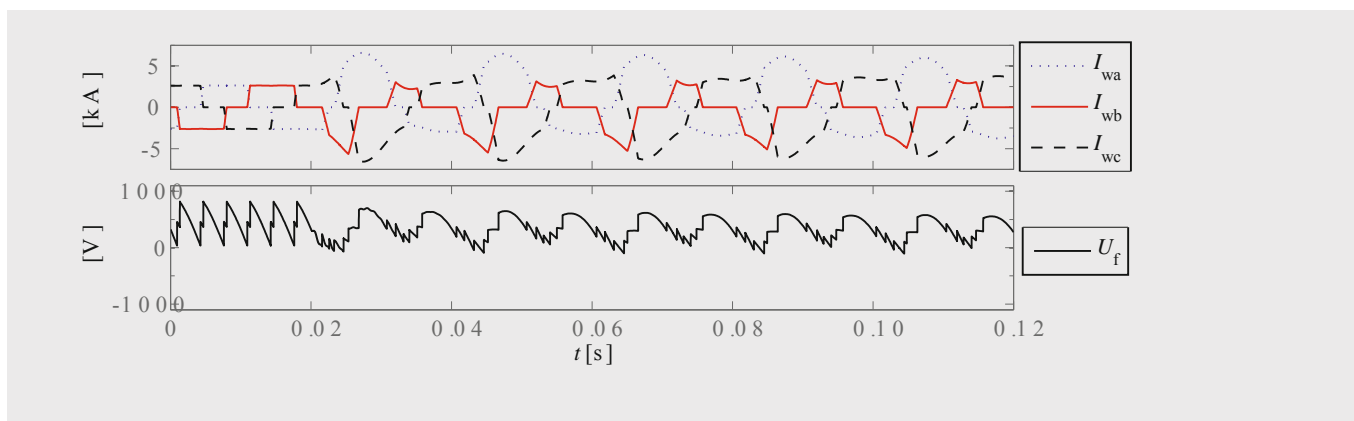
Jak wynika z rys. 8, w badanych warunkach dochodzi do utraty stabilności generatora. Granicznym czasem trwania zwarcia, po którym układ powraca do stabilnej pracy, jest ok. 370 ms.



Rys. 8. Zwarcie dwufazowe doziemne ($t_{zw} = 400$ ms) w punkcie B. Przebiegi składowych symetrycznych napięcia i prądu na zaciskach generatora (U_{g1} , U_{g2} , U_{g0} , I_{g1} , I_{g2} , I_{g0}) oraz po stronie GN na transformatorze blokowym (U_{s1} , U_{s2} , U_{s0} , I_{s1} , I_{s2} , I_{s0})



Rys. 9. Zwarcie dwufazowe doziemne w punkcie B. Przebiegi prądów transformatora wzbudzenia (I_{wa} , I_{wb} , I_{wc}) i chwilowego napięcia wzbudzenia (U_f). Układ wyzwalany z napięć zasilających przekształtnik



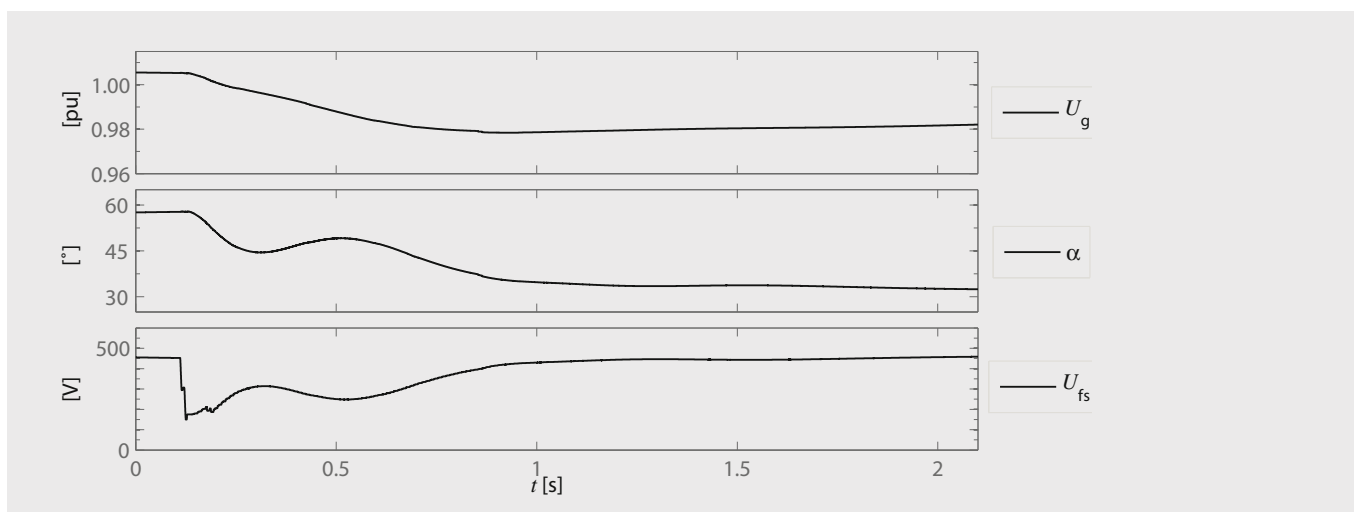
Rys. 10. Zwarcie dwufazowe doziemne w punkcie B. Przebiegi prądów transformatora wzbudzenia (I_{wa} , I_{wb} , I_{wc}) i chwilowego napięcia wzbudzenia (U_f). Układ wyzwalania synchronizowany z przekładników napięcia generatora

W trakcie zwarcia przewodzą wszystkie tyrystory, ale każdy w odmienny sposób. Szczegółowa analiza czasu przewodzenia i wartości prądów jest istotna dla oceny zagrożeń bezpiecznej pracy przekształtnika. Przebiegi napięcia wzbudzenia wskazują na złożony charakter procesu wyzwalania w tych warunkach pracy.

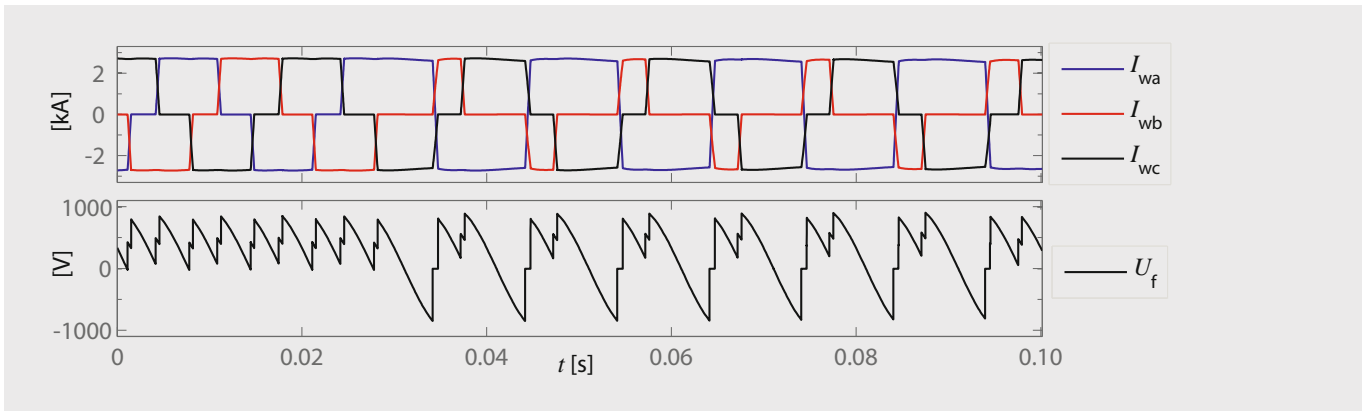
Porównując przebiegi napięcia wzbudzenia dla obu wariantów synchronizacji (rys. 9 i 10), stwierdzono, że w badanym przypadku przekształtnik tyrystorowy pracuje równomierniej, gdy układ wyzwalania tyrystorów jest synchronizowany sygnałem z przekładników napięcia generatora.

3.3. Utrata jednego z sygnałów synchronizujących

Na rys. 11 i 12 pokazano zachowanie modelu podczas utraty jednego z wytworzonych sygnałów synchronizujących. Awaryjna utrata sygnału synchronizującego powoduje utratę impulsów wyzwalających dwóch tyrystorów przekształtnika i w konsekwencji ich zablokowanie (rys. 12). Regulator utrzymuje zadaną wartość napięcia generatora, zmieniając kąt wyzwalania tyrystorów α z 60° na około 30° – pracujące tyrystory przejmują prąd dwóch zablokowanych tyrystorów. Zaburzenie średniej wartości prądu wzbudzenia trwa ok. 1 s. Napięcie generatora spada maksymalnie do $0,97 pu$, a po ok. 10 s wraca do wartości sprzed zaburzenia.



Rys. 11. Utrata jednego z sygnałów synchronizujących. Przebiegi napięcia generatora z układu pomiarowego regulatora (U_g), kąta wyzwalania tyrystorów prostownika (α) oraz wartości średniej napięcia wzbudzenia (U_{fs})



Rys. 12. Utrata jednego z sygnałów synchronizujących. Przebiegi prądów transformatora wzbudzenia (I_{wa} , I_{wb} , I_{wc}) i chwilowego napięcia wzbudzenia (U_f)

4. PODSUMOWANIE

Opracowany model generatora z układem wzbudzenia i regulacji napięcia umożliwia prowadzenie badań i analiz dowolnych stanów niesymetrycznych generatora i układu wzbudzenia. Jest to nowe rozwiązanie, niesosowane wcześniej w badaniach układów wzbudzenia. Zastosowano dyskretny model układu regulacji z realnym czasem próbkowania oraz pełnym odwzorowaniem układów pomiarowych. Opracowany model układu wyzwania tyrystorów pozwala na odwzorowanie rzeczywistych przebiegów w układach wzbudzenia. Model znajdzie zastosowanie w pracach rozwojowych układów wzbudzenia i regulacji napięcia, w analizach złożonych stanów niesymetrycznych systemu oraz w szkoleniach.

BIBLIOGRAFIA

1. Kacejko P., Machowski J., Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 2002.
2. Madajewski K., Sobczak B., Trębski R., Praca ograniczników w układach regulacji generatorów synchronicznych w warunkach niskich napięć w systemie elektroenergetycznym, *Archiwum Energetyki*, numer specjalny, XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa – Aktualne problemy w elektroenergetyce, APE 2007, Gdańsk 2007.
3. Madajewski K., Sobczak B., Dynamiczne aspekty utraty stabilności napięciowej, *Archiwum Energetyki*, tom XXXIX (2009), nr 1, 29–46 – Aktualne problemy w elektroenergetyce, APE 2009, Gdańsk 2009.