

Jerzy Hickiewicz, Józef Moch
Politechnika Opolska, Opole

ZAGROŻENIA PRZY PRACY GENERATORÓW W MAŁYCH ELEKTROWNIACH WODNYCH

THE DANGERS BY THE INDUCTION GENERATOR'S OPERATION IN A SMALL HYDROPOWER

Abstract: In the most of small hydropower as generators the induction machines are used. These generators can cooperate with grid continuously or act in an island operation. The transition from grid to island operation can be dangerous for the receivers supplied from the generator and for the generator itself due to rapid voltage and speed rise. When the generator supplies a separated island, the dynamic changes can also cause voltage growth, dangerous for supplied appliance. In the paper are discussed the types of dangers, connected with these events, and the methods to limit their negative results. Presented text describes selected results of measurement on real facilities and built on purpose laboratory model of hydropower. The large part of the investigations were done by means of simulation methods, using MATLAB/SIMULINK based mathematical models.

1. Wstęp

Znaczenie rozproszonych źródeł energii elektrycznej rośnie wraz ze wzrostem cen i wyczerpywaniem się jej zasobów. Najnowsze regulacje Komisji Europejskiej [1] narzucają poziom energii, którą państwa członkowskie powinny uzyskiwać ze źródeł odnawialnych. Inwestycje w budowę niewielkich elektrowni wodnych lub wiatraków, niedawno jeszcze mało opłacalne zyskują, w związku ze wzrostem cen energii, walor opłacalności. Instalowanie tych rozproszonych źródeł i dołączanie ich w różnych punktach sieci elektroenergetycznej wywołuje wcześniej nie występujące problemy, związane z niektórymi aspektami ich eksploatacji. W małych elektrowniach wodnych najczęściej jako generator wykorzystuje się maszynę indukcyjną, ze względu na jej znane zalety. Generator może pracować w stałym połączeniu z siecią elektroenergetyczną lub (niekiedy) na wydzielone obciążenie w trybie zasilania tzw. „wyspy” [2, 3]. Współpraca generatora indukcyjnego z siecią w stanie ustalonym nie stwarza większych problemów. Zagrożenia pojawiają się w stanach dynamicznych: dołączaniu i odłączaniu od sieci, a dla trybu wyspowego - zmian obciążeń lub ich znacznej asymetrii. Przedstawiony poniżej tekst zawiera fragment wyników pracy badawczej, przeprowadzonej pomiarowo na rzeczywistych obiektach i specjalnie zbudowanym modelem laboratoryjnym, a także metodami symulacyjnymi, po pomiarowej weryfikacji zastosowanego modelu matematycznego [4].

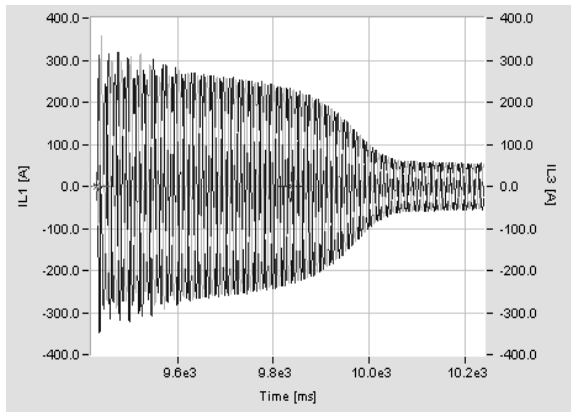
2. Współpraca z siecią elektroenergetyczną

2.1 Włączanie generatora do sieci

Amplituda i czas trwania udaru prądu przy włączaniu hydrozespołu do sieci uzależnione są od wyboru chwili włączenia w czasie rozpędzania zespołu. W elektrowniach z regulacją prędkości od strony napędu (np. z turbinami Kaplana) możliwe jest ustalenie trwałej prędkości zbliżonej do prędkości synchronicznej, przy której czas trwania stanu przejściowego po bezpośrednim włączeniu generatora do sieci jest najkrótszy. W zależności od poziomu technicznego rozwiązania układu sterowania MEW i sposobu uruchamiania hydrozespołu włączenie generatora następuje:

- przez układ śledzący po wykryciu prędkości synchronicznej,
- ręcznie przez obsługę na podstawie odczytu wskaźnika prędkości,
- bezpośrednio do sieci przy niektórych rozwiązaniach układu hydraulicznego MEW, wymagających wstępnej pracy maszyny w trybie silnikowym,
- za pośrednictwem układów ograniczających wartość prądu pobranego z sieci przy włączeniu (np. układu *soft-start*).

Włączenie dużej maszyny do sieci związane jest z chwilowym poborem znacznych prądów i skutkuje zapadem napięcia, mogącym zakłócić pracę innych urządzeń włączonych do sieci. Przykład poboru dużych prądów z sieci w czasie rozruchu hydrozespołu MEW od postoju, przedstawiono na rys.1.



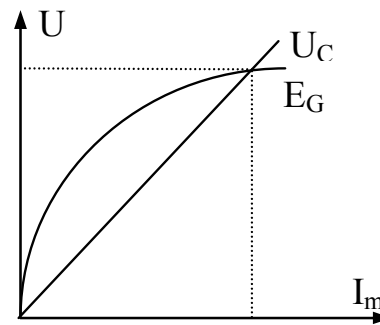
Rys. 1. Prądy generatora MEW włączanego w obwód nN

W przypadkach, kiedy generator zostaje włączony do sieci przy prędkości synchronicznej, a przede wszystkim z zastosowaniem układów ograniczających prąd rozruchowy, zagrożenia długotrwałego zapadu napięć nie występują.

2.2 Odłączanie od sieci

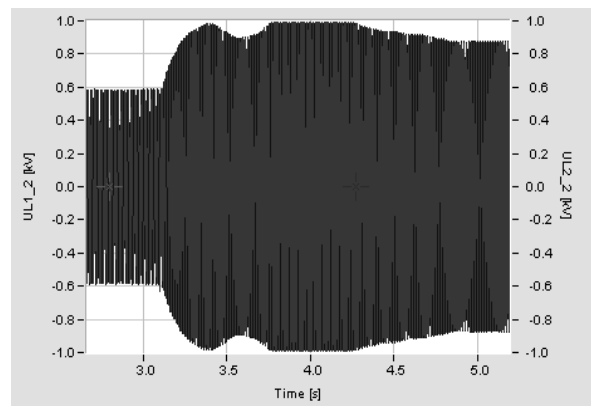
Szczególne zagrożenie wzrostem napięcia w stanie przejściowym wiąże się z przypadkowym odłączeniem się generatora indukcyjnego MEW wraz z pewnym odcinkiem sieci (tzw. „wyspą”) od systemu elektroenergetycznego. Tego rodzaju odłączenie nastąpić może np. skutkiem nieoczekiwanego zadziałania układu zabezpieczeń pod wpływem wyładowań atmosferycznych. Napięcie powstałego w ten sposób samowzbudnego generatora indukcyjnego ustala się w punkcie przecięcia charakterystyki biegu jałowego generatora z liniową zależnością napięcia od prądu dołączonej równolegle baterii kondensatorów wzbudzenia. Przebieg tych charakterystyk przy stałej prędkości generatora przedstawia rys.2.

Pozostałe na powstałej „wyspie” odbiorniki energii zasilane są wtedy wyłącznie napięciem z generatora MEW, które przestaje mieć stałą wartość i częstotliwość, wcześniej zapewnianą przez system energetyczny. W przypadku przewagi energii dostarczanej nad odbieraną następuje szybki wzrost prędkości hydrozespołu, a w konsekwencji wzrost częstotliwości i napięcia (rys.3). W elektrowni wodnej, w której zarejestrowano przedstawione przebiegi napięć, konstruktor nie przewidział odłączania kondensatorów kompensacji mocy biernej.



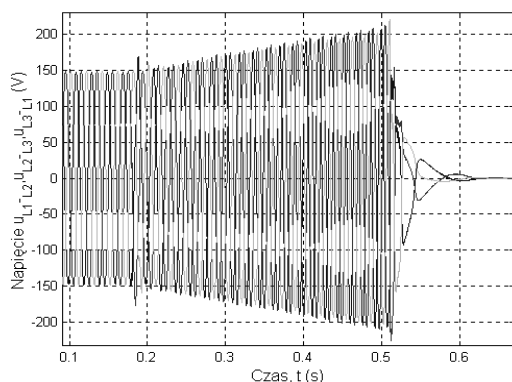
Rys. 2. Charakterystyka napięciowa E_G generatora i U_C baterii kondensatorów

Stan nieustalony może być długotrwały i powodować uszkodzenia zarówno zasilanych odbiorników, jak i układów samej elektrowni: kondensatorów wzbudzenia, układów sterowania i zabezpieczeń. Warunkiem podtrzymania samowzbudzenia generatora indukcyjnego MEW jest pozostawienie na „wyspie” kondensatorów, zwykle pełniących funkcję kompensacji mocy biernej w czasie pracy generatora.



Rys. 3. Gwałtowny wzrost napięcia generatora MEW przy odłączaniu od systemu energetycznego

W przypadku, gdy na „wyspie” do generatora dołączony jest odcinek kabla SN , zwłaszcza poprzez transformator nN/SN , jego pojemność, zwielokrotniona przez kwadrat przekładni może wystarczyć do podtrzymania wzbudzenia generatora nawet po odłączeniu kondensatorów wzbudzenia. Przypadek z tą przyczyną wzrostu napięć przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Wzrost napięcia w obwodzie SN przy odłączeniu “wyspy” z odcinkiem kabla SN

3. Praca w trybie autonomicznym

Generator indukcyjny MEW może pracować w trybie autonomicznym, pod warunkiem zapewnienia dostarczenia mu mocy biernej, w celu podtrzymania wzbudzenia. Źródłem mocy biernej jest najczęściej bateria kondensatorów. Możliwe jest także zastosowanie układów przekształtnikowych.

Przy stałej wartości momentu napędzającego generator jego napięcie zależy przede wszystkim od wartości mocy pobieranej przez obciążenie użytkowe (od rezystancji włączonej w obwód obciążenia), prędkość zaś, i związana z nią częstotliwość – od wartości prądów wzbudzenia, a więc od wartości pojemności wzbudzenia. Odbiory włączone w obwód, zasilany z generatora indukcyjnego mogą być liniowe, na ogół o charakterze rezystancyjnym lub rezystancyjno-indukcyjnym, lub nieliniowe, których przykładem są zasilacze z prostownikiem i filtrem pojemnościowym. W nielicznych przypadkach energią dostarczaną można na bieżąco nastawiać poprzez zmianę mocy (momentu mechanicznego), dostarczanej przez turbinę. W instalacjach o mniejszych mocach moc turbiny nie podlega regulacji, zadania kompensacji zmian mocy pobranej przez obciążenie musi zostać przejęte przez układ sterowania generatora MEW. Najczęściej jest ono realizowane przez jeden z wielu możliwych układów sztucznego balastu, rozpraszającego nadmiar energii w odbiornikach przekształcających energię elektryczną w ciepło. Balasty te są w stanie skompensować zmiany mocy użytecznej, a także asymetrię obciążeń poszczególnych faz generatora.

Uzwojenie stojana generatora może mieć punkt gwiazdowy wyprowadzony i połączony z przewodem neutralnym obwodu obciążenia, a do-

datkowo także z punktem gwiazdowym kondensatorów wzbudzenia, lub też może ono być izolowane od pozostałych elementów.

3.1 Zagrożenia w układzie z izolowanym punktem gwiazdy stojana generatora

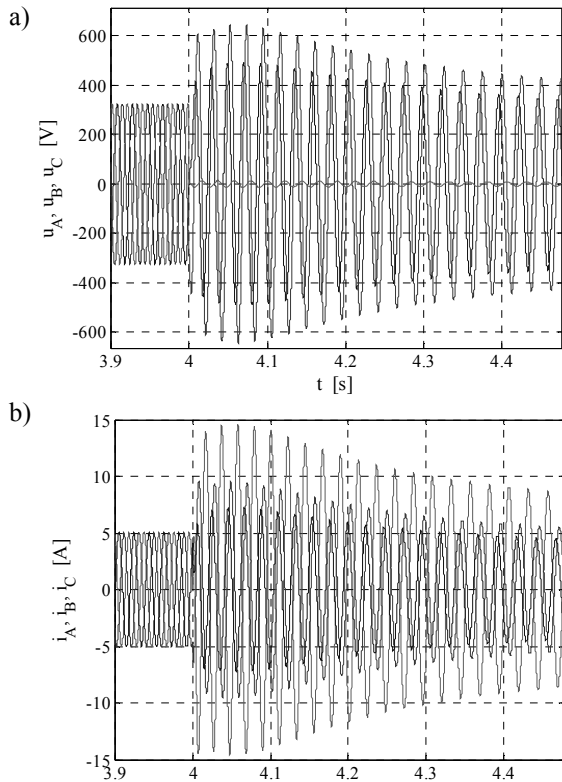
W tym przypadku kondensatory wzbudzenia mogą mieć punkt zerowy połączony z przewodem N obciążenia, lub może on być izolowany (możliwe jest też połączenie kondensatorów w trójkąt).

Przy izolowanym punkcie zerowym kondensatorów asymetria obciążeń powoduje bardzo szybko znaczny poziom asymetrii napięć, z tego powodu ten sposób połączeń nie jest zalecany.

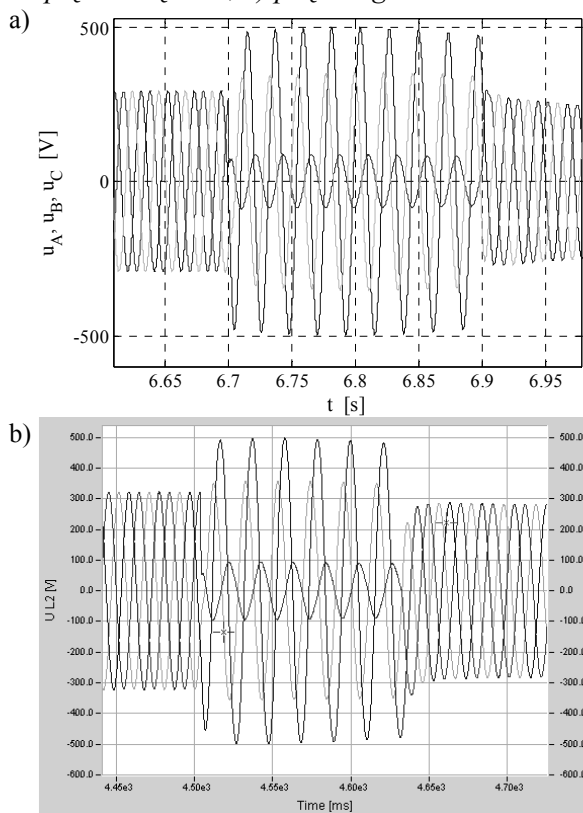
Mniejszy wpływ na asymetrię napięć ma niesymetryczne obciążenie w przypadku połączenia punktu gwiazdy kondensatorów wzbudzenia z przewodem N układu obciążenia. W skrajnych przypadkach asymetrii (zanik obciążenia lub zwarcie w jednej z faz) powstawać może układ napięć niebezpieczny dla urządzeń zasilanych z generatora.

Przypadki skrajnych asymetrii badano wykorzystując opracowane modele matematyczne [1] metodami symulacyjnymi, po wielostronnej weryfikacji pomiarowej zastosowanych narzędzi. W procesie symulacji użyto modelu, opracowanego z wykorzystaniem pakietu MATLAB-SIMULINK [5], uzupełnionego nakładką Plecs [6] firmy PLEXIM GmbH. Wyniki symulacji przypadków skrajnych przedstawiono na rysunku.

Przypadkiem, dla którego potwierdzono za pomocą pomiaru poprawność modelu matematycznego i symulacyjnego oraz prawidłowy dobór parametrów badanego generatora jest skokowa zmiana obciążenia w jednej z faz od wartości znamionowej, do wartości około 14-krotnie mniejszej (do stanu niepełnego zwarcia). Porównanie wyników symulacji i pomiaru przedstawiono na rys. 6. Z przebiegów tych wynika, że przy tej konfiguracji obwodu elektrycznego generatora znaczne przeciążenie w jednej z faz wywołuje przepięcia w dwóch pozostałych. Napięcie w jednej z faz w tym przypadku może ulec podwojeniu.



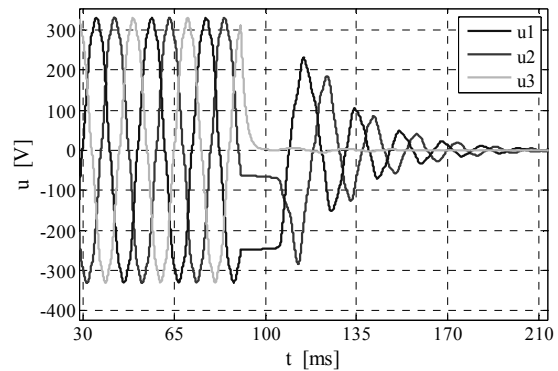
Rys. 5. Zwarcie jednofazowe, przebiegi: a) napięcie obciążenia, b) prądów generatora



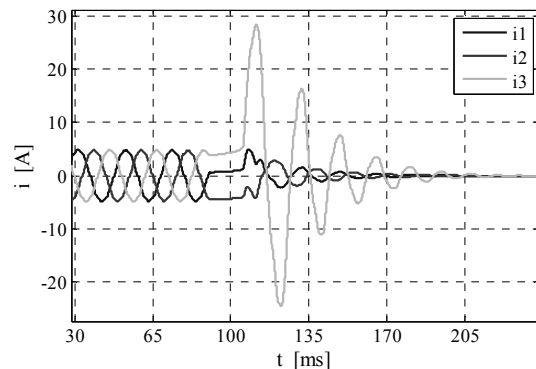
Rys. 6. Przeciążenie w fazie A (niebieski przebieg): a) wynik symulacji, b) wynik pomiaru napięcia

3.2 Zagrożenia w układzie z punktem gwiazdy stojana generatora połączonym z przewodem N obciążen

W układzie tym reakcja napięć generatora na przeciążenie lub zwarcie jest odmienna niż w poprzednim przypadku. Przedstawiony na rysunkach 7 i 8 wynik badań pełnego zwarcia, uzyskano jedynie metodą symulacyjną.

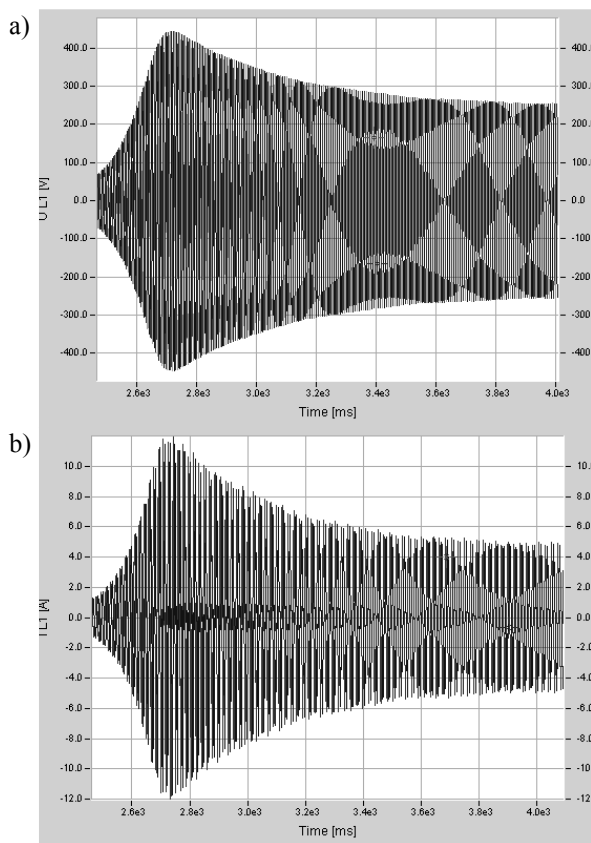


Rys. 7. Zanik napięć przy zwarciu fazowym w obwodzie obciążenia



Rys. 8. przebieg prądów przy zwarciu fazowym w obwodzie obciążenia

Od pewnego poziomu przeciążenia w układzie tym następuje zanik napięć generatora i gwałtowny wzrost prędkości hydrozespołu. Stan ten staje się niebezpieczny po ustąpieniu zwarcia przy znacznej prędkości generatora, ponieważ następuje wtedy ponowne wzbudzenie z wysoką częstotliwością i amplitudami początkowymi napięć. Przypadek taki ilustrują przebiegi zmierzone w układzie laboratoryjnym (rys.9).



Rys. 9. Zarejestrowane przebiegi: a) napięcie, b) prądów po ustąpieniu zwarcia, w trakcie ponownego wzbudzenia generatora przy dużej prędkości

4. Podsumowanie

Niektóre zjawiska dynamiczne w pracy trójfazowego generatora indukcyjnego mogą wywoływać zagrożenia z powodu znacznych przepięć w zasilanych obwodach, a w pewnych przypadkach z powodu wzrostu częstotliwości generowanego napięcia. Zagrożenia te mogą powstać zarówno przy współpracy generatora z siecią, jak i w trybie pracy autonomicznej.

Przy projektowaniu elektrowni z generatorami pracującymi „na sieć” należy zwracać szczególną uwagę na to, by w momencie „wyspowania” dokonać natychmiastowego odłączenia generatora od pozostałych elementów obwodu ze względu na możliwość podtrzymania samowzbudzenia przez te elementy.

W pracy na wydzielone obciążenie („wyspę”) przepięcia mogą zostać wywołane przez nie wyłączane na czas przeciążenia w obwodach obciążeń użytkowych. Projekt części elektrycznej małych elektrowni wodnych powinien zawierać obliczenia symulacyjne stanów dynamicznych i stanów przejściowych pracy zespołu, pozwalający na wykrycie zagrożeń

i opracowanie środków zapobiegawczych już na etapie projektowania. Wymaga to jednak uwzględnienia w modelach matematycznych i symulacyjnych generatorów indukcyjnych asymetrii obciążenia oraz nieliniowości magnetycznej obwodów magnetycznych, przede wszystkim głównego, i obwodów strumieni rozproszenia w strefie żłobkowej [7, 8].

5. Literatura

- [1]. Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady Europy nr 1230/2003/WE z 26 czerwca 2003r. *Intelligent Energy-Europe, dotycząca wieloletniego, obejmującego okres 2003 - 2006r., programu akcyjnego doskonalszego korzystania z energii.*
- [2]. Hickiewicz J., Moch J.: *Pomiarowa ocena maszyny indukcyjnej pracującej jako generator w małej elektrowni wodnej.* Wiadomości Elektrotechniczne Nr 12/2005, str.14-16.
- [3]. Hickiewicz J., Moch J.: *Pomiary stanów statycznych i dynamicznych generatorów indukcyjnych w małych elektrowniach wodnych.* V Ogólnopolska Konferencja „Postępy w Elektrotechnice stosowanej” PES’5, 20-24.06.2005, Kościelisko, tom I, str.195-202.
- [4]. Moch J.: *Zagrożenia wynikające ze zjawiska chwilowego przejścia generatora indukcyjnego elektrowni wodnej do pracy wyspowej.* Rozprawa doktorska Politechniki Opolskiej, 2007r.
- [5]. *SimPowerSystem For Use with Simulink®. Users Guide version 3, The MathWorks 2003.*
- [6]. *Plecs circuit simulation at system level, User Manual Version 1.5.© by Plexim GmbH 2007.*
- [7]. Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Wach P.: *Mathematical model of induction motor regarding the rotor leakage inductance non-linearity and the method of identification of parameters,* Materiały XII Sympozjum“ Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits“, Poznań 1994, str. 261-266.
- [8]. Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Kamiński M.: *Uwzględnienie nasycenia magnetycznego w obwodowych modelach matematycznych maszyn indukcyjnych,* III Krajowa Konferencja „Postępy w Elektrotechnice Stosowanej“ PES-3, Kościelisko, 18-22.06.2003, str. 153-159.

Autorzy

dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz,

dr inż. Józef Moch

Politechnika Opolska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, IUEiEP, 45-036 Opole, ul. Luboszycka 7, tel. 077 4538447.

Adresy e-mail: j.hickiewicz@po.opole.pl,
j.moch@po.opole.pl.